



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  

---

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
DE JAÉN**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
CARTOGRÁFICA, GEODÉSICA Y  
FOTOGRAMETRÍA**

**TESIS DOCTORAL**

**MONITORIZACIÓN GEODÉSICA DE  
DEFORMACIONES EN EL ARCHIPIÉLAGO  
BALEAR Y EN EL SECTOR ORIENTAL DE LA  
CORDILLERA BÉTICA A PARTIR DE SERIES  
TEMPORALES GNSS DE ESTACIONES  
PERMANENTES POR PROCESADO PPP**

**PRESENTADA POR:  
ALBERTO SÁNCHEZ ALZOLA**

**DIRIGIDA POR:  
DR. D. ANTONIO JOSÉ GIL CRUZ  
DRA. DÑA. MARÍA JESÚS BORQUE ARANCÓN**

**JAÉN, 16 DE JUNIO DE 2014**

**ISBN 978-84-8439-971-1**



*A mis padres José María y Charo  
y a mi hermana Elena*



*Reconozco que lo puedes todo; ningún proyecto te es imposible.  
¿Quién ensombrece tu designio con palabras insensatas?  
He hablado sin cordura de maravillas que no alcanzo ni comprendo.  
Escucha, déjame hablar, yo te interrogaré y tú me instruirás.  
Sólo te conocía de oídas pero ahora, en cambio, te han visto mis ojos.  
Por eso retracto mis palabras y en polvo y ceniza hago penitencia.*

Job, 42



## Agradecimientos

---

Dice la sabiduría castellana que “*es de bien nacido ser agradecido*”. El agradecimiento, que en ocasiones pasa desapercibido y al que a veces no se le da la importancia debida, cobra en esta ocasión un significado especial. Si ya la realización de una tesis doctoral es siempre una tarea compleja y de gran envergadura para cualquier persona, en ocasiones la conjunción de factores adversos puede dar al traste con todo el esfuerzo realizado. Por esta razón, la memoria de aquellos que, de algún modo u otro, ayudaron a conseguir la meta de terminar este trabajo es, si cabe, aún más sincera.

En primer lugar quiero agradecer a Dios, por haberme dado la fuerza, la paciencia, el tesón y el entendimiento para concluir esta tesis doctoral. Testigo de muchos años de formación y esfuerzo, para nosotros se quedan las interminables jornadas de contraste de metodologías y software en el verano de 2013, las largas revisiones de capítulos y referencias durante la noche y las numerosas horas delante de la pantalla del ordenador. Siempre he notado su apoyo sutil durante este tiempo, manifestado en forma de una bella brotación de mis bonsais, en un luminoso atardecer desde mi ventana o en el alegre canto de mis canarios. Su luz me ha guiado siempre a la hora de discernir en la oscuridad de la indecisión.

En segundo lugar quiero dar las gracias de manera muy especial a mis directores de tesis Antonio José Gil Cruz y María Jesús Borque Arancón, por haber confiado en mi dándome una segunda oportunidad cuando más lo necesitaba. Sus continuos consejos, apoyo y ánimos, no siempre en las mejores condiciones personales, han sido de gran ayuda para enfrentarme a la difícil tarea de dar forma y concluir este trabajo. Hago extensible mi agradecimiento también a los que colaboraron para la realización de los artículos del Bajo Segura y Baleares, en especial a Pedro Alfaro, por su revisión del capítulo de geología y sus aportaciones finales. Sin todos ellos no hubiera sido posible depositar esta tesis doctoral.

En este punto quiero tener un recuerdo a los miembros del LAGC de la Universidad de Cádiz, por ofrecerme la oportunidad de empezar en este mundo de la investigación; en especial a Raúl Páez, que me enseñó que un ordenador con la programación adecuada podía darte muchas satisfacciones. También recordar a mis buenas amigas de la Antártida Cintia Bengoa y Araceli García-Yeguas, por

sus continuas palabras de aliento en los momentos difíciles y esos buenos ratos que pasamos en el continente helado.

En estas líneas quiero tener un reconocimiento especial a Yolanda Jiménez y María Eva Ramirez. Dos investigadoras brillantes y mejores personas con una carrera prometedora en sus respectivos campos. Con ellas tuve la suerte de compartir algunos años en el *garito* en condiciones complicadas. Ellas me enseñaron que vale la pena luchar por lo que quieres cuando las circunstancias se vuelven adversas.

También quiero recordar a mis buenos amigos de Cádiz: M<sup>a</sup> Eugenia, Lucía, Germán y M<sup>a</sup> Jesús; y de Jaén: Jessica, Dani, Virtu, Jose, Encarni y David. Gracias por esos magníficos ratos que he podido compartir con vosotros durante el desarrollo de esta tesis doctoral. Sin duda, la mejor compañía para no dejarse llevar por el desaliento y las preocupaciones propias del trabajo de investigación. Amigos que me ayudaron a ver el horizonte con otra perspectiva y con los que espero contar siempre.

Y para finalizar agradecer a mi familia de Jerez, Valladolid y Vitoria, siempre pendientes de mis progresos. En especial a mis padres José María y Charo, por su confianza y apoyo incondicional en estos años. Ellos son los que han vivido en primera persona los avances, retrasos, problemas y demás vicisitudes derivadas de esta tesis doctoral. Siempre han estado ahí en los momentos buenos y no tan buenos, cuando en mayo de 2011 estaba todo perdido y ahora que veo el trabajo terminado. Esta tesis también es suya.





# Índice general

---

<b>Índice general</b>	<b>XI</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>XIX</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XXV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	3
1.2. Contenidos de la tesis . . . . .	4
<b>2. Antecedentes</b>	<b>7</b>
2.1. Estudios de deformaciones desarrollados con geodesia espacial . .	7
2.2. Estudios planteados en las zonas de trabajo . . . . .	10
<b>3. Descripción geológica y tectónica</b>	<b>31</b>
3.1. Localización geográfica . . . . .	31
3.2. Cordillera Bética . . . . .	33
3.2.1. Contexto geodinámico . . . . .	33
3.2.1.1. Zonas Externas . . . . .	34
3.2.1.2. Zonas Internas . . . . .	35
3.2.1.3. Complejo del Campo de Gibraltar . . . . .	36

3.2.1.4.	Cuencas Neógeno-Cuaternarias . . . . .	36
3.2.1.5.	Vulcanismo neógeno . . . . .	37
3.2.2.	Tectónica Activa . . . . .	37
3.2.3.	Sismicidad . . . . .	40
3.3.	Archipiélago Balear . . . . .	42
3.3.1.	Descripción y litología . . . . .	42
3.3.1.1.	Promontorio Balear . . . . .	42
3.3.1.2.	Isla de Menorca . . . . .	43
3.3.1.3.	Isla de Mallorca y Archipiélago de Cabrera . . . . .	43
3.3.1.4.	Islas Pitiusas . . . . .	45
3.3.2.	Tectónica . . . . .	46
3.3.3.	Sismicidad . . . . .	47
<b>4.</b>	<b>Sistemas de Referencia</b>	<b>49</b>
4.1.	Conceptos Generales . . . . .	49
4.1.1.	Sistema de Referencia Terrestre (TRS) . . . . .	50
4.1.2.	Marco de referencia terrestre (TRF) . . . . .	51
4.2.	El Sistema de Referencia ITRS . . . . .	52
4.3.	Los marcos de referencia ITRF . . . . .	53
4.3.1.	ITRF2000 . . . . .	53
4.3.2.	ITRF2005 . . . . .	54
4.3.3.	ITRF2008 e ITRF2013 . . . . .	55
4.3.4.	Parámetros de transformación . . . . .	57
4.4.	Los marcos de referencia IGS . . . . .	58
4.4.1.	El Servicio Internacional GNSS (IGS) . . . . .	58
4.4.2.	Desarrollo de los Marcos IGS . . . . .	59
4.5.	El Sistema de Referencia ETRS89 . . . . .	60
4.5.1.	Transformación de coordenadas a ETRS89 . . . . .	62
4.6.	El Sistema Geodésico WGS84 . . . . .	65
4.6.1.	Desarrollo de las realizaciones WGS84 . . . . .	66

---

<b>5. Los Sistemas GNSS</b>	<b>69</b>
5.1. Descripción de los Sistemas GNSS . . . . .	69
5.1.1. El Sistema GPS . . . . .	69
5.1.2. El Sistema GLONASS . . . . .	71
5.1.3. El Sistema Galileo . . . . .	73
5.1.4. El Sistema BeiDou-2/COMPASS . . . . .	76
5.2. Características del sistema GPS . . . . .	77
5.2.1. Segmentos del Sistema GPS . . . . .	77
5.2.1.1. El segmento espacial . . . . .	77
5.2.1.2. El segmento de control . . . . .	80
5.2.1.3. El segmento usuario . . . . .	81
5.3. Ecuaciones de observación GPS . . . . .	82
5.3.1. Ecuación de observación de la pseudodistancia . . . . .	82
5.3.2. Ecuación de observación fase de la portadora . . . . .	85
5.4. Elementos que afectan a las medidas GPS . . . . .	90
5.4.1. Atmósfera . . . . .	90
5.4.1.1. Troposfera . . . . .	90
5.4.1.2. Ionosfera . . . . .	93
5.4.2. Órbitas . . . . .	98
5.4.2.1. Efemérides transmitidas . . . . .	98
5.4.2.2. Efemérides para postproceso . . . . .	99
5.4.3. Osciladores . . . . .	100
5.4.4. Pérdidas de ciclo . . . . .	101
5.4.5. Geometría de los satélites . . . . .	103
5.4.6. Centro de fase de las antenas (PCO) . . . . .	104
5.4.7. Efecto Wind Up . . . . .	106

5.4.8.	Retardos electrónicos . . . . .	107
5.4.9.	Efectos relativistas . . . . .	108
5.4.10.	Efecto Multipath . . . . .	109
5.4.11.	Problemas en los satélites . . . . .	110
5.4.12.	Mareas terrestres . . . . .	110
5.4.13.	Carga Oceánica . . . . .	111
<b>6.</b>	<b>Procedimientos y software</b>	<b>115</b>
6.1.	Posicionamiento . . . . .	115
6.1.1.	Introducción . . . . .	115
6.1.2.	Posicionamiento absoluto por código . . . . .	116
6.1.3.	Posicionamiento absoluto por fase . . . . .	118
6.1.4.	Posicionamiento relativo . . . . .	119
6.1.4.1.	Simple diferencias . . . . .	119
6.1.4.2.	Dobles diferencias . . . . .	121
6.1.4.3.	Triples diferencias . . . . .	122
6.2.	Posicionamiento Puntual de Precisión (PPP) . . . . .	123
6.2.1.	Modelo matemático . . . . .	124
6.2.1.1.	Combinación libre de ionosfera . . . . .	126
6.2.1.2.	Combinación libre de geometría . . . . .	126
6.2.1.3.	Combinación Wide-Lane (WL) o banda ancha . . . . .	126
6.2.1.4.	Combinación Narrow-Lane (NL) o banda estrecha . . . . .	127
6.2.1.5.	Combinación Melbourne-Wübbena (MW) . . . . .	127
6.2.2.	Solución de ambigüedades . . . . .	127
6.2.2.1.	Estimación de las FCB . . . . .	129
6.2.2.2.	Integer Recovery-Clock . . . . .	130

---

6.2.2.3.	Decoupled Clock Model . . . . .	131
6.2.2.4.	Estimación de ambigüedades en GIPSY-OASIS . . . . .	131
6.2.3.	Estimación de parámetros . . . . .	132
6.3.	Programas de procesamiento PPP . . . . .	133
6.3.1.	GIPSY-OASIS . . . . .	134
6.3.2.	Bernese 5.0 . . . . .	138
6.3.3.	Servicios de procesamiento PPP online . . . . .	143
6.3.3.1.	Servicio PPP online del JPL (APPS) . . . . .	143
6.3.3.2.	Servicio PPP online del CSRS (CSRS-PPP) . . . . .	144
6.3.3.3.	Servicio PPP online del GAPS . . . . .	145
6.3.3.4.	Servicio PPP online de GMV (MagicGNSS) . . . . .	146
6.4.	Series temporales . . . . .	149
6.4.1.	Estudios de variabilidad en la serie . . . . .	150
6.4.2.	El programa CATS . . . . .	152
<b>7.</b>	<b>Redes GNSS en las zonas de estudio</b>	<b>155</b>
7.1.	Redes permanentes GNSS . . . . .	155
7.1.1.	Monumentación . . . . .	157
7.1.2.	Instrumentación . . . . .	158
7.2.	Distribución . . . . .	160
7.2.1.	Red permanente EUREF-(EPN) . . . . .	160
7.2.2.	Red de la Comunidad Valenciana (ERVA) . . . . .	162
7.2.3.	Red del Archipiélago Balear (XGAIB) . . . . .	164
7.2.4.	Red Andaluza de Posicionamiento (RAP) . . . . .	165
7.2.5.	Red de la Comunidad Murciana (REGAM) . . . . .	167
7.3.	Elección de estaciones . . . . .	168
7.3.1.	Criterios de selección . . . . .	168

<b>8. Estimación de la velocidad y deformación en las zonas de estudio</b>	<b>175</b>
8.1. Fases de trabajo . . . . .	176
8.1.1. Descarga y gestión de datos . . . . .	176
8.1.2. Procesado de la señal GPS . . . . .	177
8.1.2.1. Software GIPSY-OASIS . . . . .	177
8.1.2.2. Aplicación PPP del Bernese 5.0 . . . . .	180
8.1.2.3. Aplicaciones online APPS y CSRS . . . . .	183
8.1.3. Velocidades de referencia y modelos . . . . .	184
8.1.3.1. Procesado relativo semanal de EUREF . . . . .	184
8.1.3.2. Velocidad estimada a partir de la serie del JPL . . . . .	185
8.1.3.3. Modelo tectónico de velocidad . . . . .	186
8.1.4. Generación de series temporales . . . . .	188
8.1.5. Estimación de velocidad de las estaciones . . . . .	189
8.1.6. Estimación de la deformación . . . . .	190
8.2. Comprobación de la metodología . . . . .	192
8.3. Estimación de velocidad con GIPSY-OASIS . . . . .	201
8.4. Comparación de resultados . . . . .	212
8.5. Estimación de la deformación en las zonas de estudio . . . . .	217
<b>9. Interpretación de resultados</b>	<b>221</b>
9.1. Comparativa de metodología y aplicaciones . . . . .	221
9.1.1. Velocidad estimada en las estaciones de control . . . . .	221
9.1.2. Ruido blanco en la serie temporal . . . . .	223
9.1.3. Desviaciones con otros valores de velocidad . . . . .	224
9.1.4. Desviaciones con el modelo teórico GEODVEL . . . . .	225
9.2. Estimación de velocidades en las distintas zonas de estudio . . . . .	227
9.2.1. Comparativa según intervalo de la serie temporal . . . . .	228
9.2.2. Comparativa con el software Bernese 5.0 . . . . .	229
9.3. Estimación de esfuerzos en las zonas de estudio . . . . .	230
9.4. Correspondencia con trabajos anteriores y estructuras geológicas . . . . .	230
9.4.1. Sector oriental de la Cordillera Bética . . . . .	230
9.4.2. Archipiélago Balear . . . . .	232

<b>10. Conclusiones</b>	<b>235</b>
10.1. Conclusiones generales . . . . .	235
10.1.1. Conclusiones relativas a la metodología . . . . .	236
10.1.2. Conclusiones relativas a la geodinámica . . . . .	237
10.2. Trabajos futuros . . . . .	238
<b>Acrónimos</b>	<b>241</b>
<b>Referencias</b>	<b>255</b>



## Índice de figuras

---

2.1. Campo de velocidades. <a href="#">Fadil et ál. (2006)</a> . . . . .	12
2.2. Modelo elástico de bloques. <a href="#">Fadil et ál. (2006)</a> . . . . .	13
2.3. Campo de velocidades. <a href="#">Stich et ál. (2006)</a> . . . . .	14
2.4. Mapa de esfuerzos. <a href="#">Serpelloni et ál. (2007)</a> . . . . .	15
2.5. Campo de velocidades y esfuerzos. <a href="#">Fernandes et ál. (2007)</a> . . . . .	17
2.6. Campo de velocidades. <a href="#">Pérez-Peña et ál. (2010)</a> . . . . .	18
2.7. Mapa de esfuerzos definido. <a href="#">Pérez-Peña et ál. (2010)</a> . . . . .	19
2.8. Campo de velocidades residuales. <a href="#">Vernant et ál. (2010)</a> . . . . .	20
2.9. Modelo de convergencia de placas. <a href="#">Vernant et ál. (2010)</a> . . . . .	21
2.10. Campo de velocidades residuales. <a href="#">Koulali et ál. (2011)</a> . . . . .	23
2.11. Campo de velocidades y bloques. <a href="#">Koulali et ál. (2011)</a> . . . . .	23
2.12. Campo de velocidades residuales y bloques. <a href="#">Nocquet (2012)</a> . . . . .	24
2.13. Campo de velocidades. <a href="#">Palano et ál. (2013a)</a> . . . . .	26
2.14. Mapa de esfuerzos. <a href="#">Palano et ál. (2013a)</a> . . . . .	27
2.15. Campo de velocidades. <a href="#">Mancilla et ál. (2013)</a> . . . . .	28
2.16. Campo de velocidades. <a href="#">Echeverria et ál. (2013)</a> . . . . .	29
2.17. Mapa de esfuerzos. <a href="#">Echeverria et ál. (2013)</a> . . . . .	30
3.1. Mapa general de las zonas de estudio . . . . .	32

3.2. Mapa de las unidades de las Cordillera Bética . . . . .	33
3.3. Mapa geológico de la zona sureste de la Cordillera Bética . . . . .	35
3.4. Tectónica General de la Cordillera Bética . . . . .	38
3.5. Mapa Tectónico de la zona sureste de la Cordillera Bética . . . . .	39
3.6. Representación de la actividad sísmica en la Cordillera Bética . . .	41
3.7. Mapa geológico y tectónico de la Isla de Mallorca . . . . .	44
3.8. Mapa geológico y tectónico de las Islas Pitiusas y Menorca . . . . .	46
3.9. Representación de actividad sísmica en el Archipiélago Balear . . .	48
4.1. Representación de sistemas de referencia astronómico y terrestre . .	50
4.2. Distribución geográfica de las estaciones para el marco ITRF2008 . . .	55
4.3. Distribución geográfica de las estaciones IGS . . . . .	59
4.4. Distribución geográfica de las estaciones EUREF . . . . .	61
4.5. Sistema de referencia WGS84 . . . . .	65
5.1. El Sistema GPS . . . . .	70
5.2. Efectos de la disponibilidad selectiva . . . . .	71
5.3. El Sistema GLONASS . . . . .	72
5.4. Constelación Galileo . . . . .	74
5.5. Constelación BeiDou/COMPASS . . . . .	76
5.6. Segmentos del Sistema GPS . . . . .	78
5.7. Distribución de la señal y frecuencias GPS . . . . .	80
5.8. Segmento de Control GPS . . . . .	80
5.9. Representación de las escalas de tiempo GPS . . . . .	83
5.10. Representación del cálculo de ambigüedades GPS . . . . .	87
5.11. Distribución de los ciclos solares . . . . .	95
5.12. Representación de la señal sobre la ionosfera . . . . .	96

---

5.13. Detección de saltos de ciclo con combinación Melbourne-Wübbena	102
5.14. Geometría de satélites . . . . .	103
5.15. Representación del PCO relativo en el satélite GPS . . . . .	104
5.16. Modelo de antena de receptor . . . . .	105
5.17. Representación de una onda polarizada circular . . . . .	107
5.18. Efecto Multipath . . . . .	109
5.19. Representación de la marea terrestre . . . . .	112
5.20. Áreas de cálculo de los modelos de carga oceánica . . . . .	113
6.1. Simples diferencias de fase . . . . .	120
6.2. Dobles diferencias de fase . . . . .	121
6.3. Triples diferencias de fase . . . . .	122
6.4. Diagrama de flujo de las aplicaciones en GIPSY-OASIS 6.2 . . . . .	134
6.5. Diagrama de flujo de las aplicaciones en Bernese 5.0 . . . . .	140
6.6. Serie temporal de los residuos de la estación SFER . . . . .	151
6.7. Estructura de fichero CATS . . . . .	153
7.1. Esquema de funcionamiento de una red permanente GNSS . . . . .	156
7.2. Ejemplos de monumentación . . . . .	158
7.3. Distribución de elementos de una estación permanente GNSS . . . . .	159
7.4. Representación de la antena de una estación permanente GNSS . . . . .	160
7.5. Estaciones EUREF en la Península Ibérica y Baleares . . . . .	161
7.6. Distribución geográfica de las estaciones de la red ERVA . . . . .	163
7.7. Distribución geográfica de las estaciones de la red XGAIB . . . . .	164
7.8. Distribución geográfica de las estaciones de la red RAP . . . . .	165
7.9. Distribución geográfica de las estaciones de la red REGAM . . . . .	167
7.10. Distribución geográfica de las estaciones seleccionadas . . . . .	169

7.11. Estaciones seleccionadas según red de pertenencia . . . . .	170
8.1. Extracto de fichero stacov . . . . .	180
8.2. Extracto de fichero SINEX . . . . .	182
8.3. Extracto de correo electrónico de CSRS-PPP . . . . .	183
8.4. Estaciones EUREF con serie temporal superior a 10 años . . . . .	184
8.5. Series temporales de comprobación para la estación ALAC . . . . .	194
8.6. Series temporales de comprobación para la estación ALME . . . . .	195
8.7. Series temporales de comprobación para la estación EBRE . . . . .	196
8.8. Series temporales de comprobación para la estación MALL . . . . .	197
8.9. Series temporales de comprobación para la estación VALE . . . . .	198
8.10. Vectores de velocidad absoluta. Aplicaciones PPP online . . . . .	199
8.11. Vectores de velocidad residual. Aplicaciones PPP online . . . . .	199
8.12. Vectores de velocidad absoluta. Software PPP . . . . .	200
8.13. Vectores de velocidad residual. Software PPP . . . . .	200
8.14. Series temporales de las estaciones ABAN y ALAC . . . . .	201
8.15. Series temporales de las estaciones ALCA, ALCO, ALME y ALMR	202
8.16. Series temporales de las estaciones ALOR, AYOR, BONA y BORR	203
8.17. Series temporales de las estaciones CAAL, CARA, EBRE y EIVI	204
8.18. Series temporales de las estaciones FORM, GRA1, HUOV y JORD	205
8.19. Series temporales de las estaciones JUMI, MALL, MAZA y MENC	206
8.20. Series temporales de las estaciones MORA, MOTR, MULA y MURC	207
8.21. Series temporales de las estaciones PALC, SINE, TERU y TORR	208
8.22. Series temporales de las estaciones TRAM, VALE, VCIA y VIAR	209
8.23. Campo de velocidades absolutas de las 34 estaciones . . . . .	211
8.24. Campo de velocidades residuales de las 34 estaciones . . . . .	211

8.25. Campo de velocidades absolutas. Varios intervalos . . . . .	215
8.26. Campo de velocidades residuales. Varios intervalos . . . . .	215
8.27. Campo de velocidades absolutas procesadas con GOA y BSW . . .	216
8.28. Campo de velocidades residuales procesadas con GOA y BSW . . .	216
8.29. Strain rates calculados en el S.O. de la Cordillera Bética . . . . .	219
8.30. Mapa de deformación en el S.O de la Cordillera Bética . . . . .	219
8.31. Strain rates calculados en el Archipiélago Balear . . . . .	220
8.32. Mapa de deformación en el Archipiélago Balear . . . . .	220
9.1. Campo de velocidad residual en el S.O. de la Cordillera Bética . . .	231
9.2. Campo de velocidad residual en el Archipiélago Balear . . . . .	233



## Índice de tablas

---

4.1. Parámetros de transformación de ITRF2008 a ITRFs anteriores . . . . .	58
4.2. Períodos de vigencia de los marcos de IGS entre IGS97 e IGS08 . . . . .	60
4.3. Parámetros de transformación a aplicar en ETRS89 . . . . .	63
4.4. Parámetros de transformación de ITRFyy a ETRF2000 . . . . .	64
4.5. Parámetros de los elipsoides GRS80 y WGS84 . . . . .	66
5.1. Servicios disponibles en el sistema Galileo . . . . .	75
5.2. Lista de satélites BeiDou/COMPASS a 1 de enero de 2013 . . . . .	77
5.3. Efemérides facilitadas por IGS . . . . .	100
5.4. Ficheros de reloj facilitados por IGS . . . . .	101
6.1. Ficheros descargados por el programa GIPSY-OASIS . . . . .	136
6.2. Contenido de las carpetas de campaña BSW . . . . .	139
6.3. Características de los procesamientos PPP online . . . . .	148
7.1. Estaciones EUREF en la Península Ibérica y Baleares . . . . .	162
7.2. Designación de las estaciones de la red ERVA . . . . .	163
7.3. Designación de las estaciones de la red XGAIB . . . . .	165
7.4. Designación de las estaciones de la red RAP . . . . .	166
7.5. Designación de las estaciones de la red REGAM . . . . .	168
7.6. Coordenadas cartesianas de las estaciones de las zonas de estudio . . . . .	171

7.7. Coordenadas geodésicas de las estaciones de las zonas de estudio .	172
7.8. Receptores y antenas de las estaciones de las zonas de estudio . .	173
8.1. Direcciones FTP de descarga de datos y observaciones . . . . .	176
8.2. Parámetros de entrada en el procesado con GIPSY-OASIS . . . .	179
8.3. Ficheros de apoyo para el procesado PPP . . . . .	180
8.4. Distribución inicial de ficheros en el procesado BSW-PPP . . . . .	181
8.5. Velocidades de las estaciones EUREF. Métodos de comprobación .	185
8.6. Errores en las componentes tridimensionales de las series del JPL	186
8.7. Modelos tectónicos disponibles en la página web de UNAVCO . .	188
8.8. Velocidades de las estaciones EUREF. Aplicaciones PPP online .	192
8.9. Velocidades de las estaciones EUREF. Software PPP . . . . .	192
8.10. Velocidades absolutas de las 34 estaciones y modelo GEODVEL .	210
8.11. Velocidades de las estaciones procesadas con GOA. Varios intervalos	213
8.12. Velocidades de las estaciones procesadas con GOA y BSW . . . .	214
8.13. Valores de deformación en el S.O. de la Cordillera Bética . . . . .	217
8.14. Valores de deformación en el Archipiélago Balear . . . . .	218
9.1. Velocidades absolutas de las estaciones de control . . . . .	222
9.2. Errores de procesado en las estaciones de control . . . . .	222
9.3. Ruido blanco estimado en las estaciones de control . . . . .	224
9.4. Velocidades residuales de las estaciones de control . . . . .	225
9.5. Velocidades residuales de las estaciones de control . . . . .	226
9.6. Velocidades relativas de las estaciones de las zonas de estudio . . .	228





# 1

## Introducción

---

*“... y sin embargo se mueve”*

G. Galilei (1564-1642)

*Eppur si muove* es la frase que se le atribuye al astrónomo y matemático italiano Galileo Galilei al abjurar públicamente del punto de vista heliocéntrico ante el tribunal de la Inquisición. Apócrifa o no, esta afirmación resume el escepticismo reinante en aquella época ante el hecho de considerar la Tierra un punto fijo o con un desplazamiento respecto al centro del Sistema Solar. Muchos años han pasado ya desde ese lejano 22 de junio de 1633 y estas discusiones científicas, actualmente ya superadas, han dado paso a una serie de avances que han permitido aspectos inimaginables entonces como puede ser el posicionamiento preciso de puntos de la superficie terrestre e, incluso, la medida de los desplazamientos relativos entre dichos puntos y la deformación de la corteza terrestre, no solamente desde un punto de vista teórico, sino analítico y numérico.

La encargada de responder este tipo de cuestiones, como ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra, es la Geodesia. Sus orígenes, relacionados con la geometría y la cartografía, inicialmente estaban centrados en la medida directa de ángulos y distancias sobre la superficie terrestre. Su evolución posterior, al calor de los avances científicos y técnicos, dieron lugar a nuevas variantes como son la Geodesia Física y la Geodesia Espacial, esta última fruto de la revolución tecnológica desarrollada durante el Siglo XX ([Vanicek y Krakiwski, 1992](#)).

Las numerosas técnicas geodésicas espaciales que han surgido de la investigación en este campo en las últimas décadas no han hecho más que ampliar el abanico de aplicaciones que hasta ahora podían realizarse. Dentro del posicionamiento puntual el más conocido y versátil por razones de portabilidad y uso es el GPS (*Global Positioning System*), aunque también se pueden destacar otras aplicaciones como el VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*) y Doris (*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated*

*by Satellite*). En la actualidad, con la incorporación de nuevas constelaciones de satélites artificiales, la terminología GPS ha quedado ampliada con la de GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que comprende no sólo la NAVSTAR/GPS americana sino también otras constelaciones de satélites como GLONASS y Galileo (Seeber, 2003).

De hecho, el uso de observaciones GNSS en campañas episódicas ha sido una de las metodologías que más profusamente ha sido utilizada en investigación para la cuantificación de la deformación cortical. La utilización de los sistemas de posicionamiento global para la medida de la deformación de la corteza permite la monitorización de áreas tectónicamente activas y la detección de movimientos relativos que, aún siendo de pequeña magnitud, pueden ser medidos y analizados.

En la Península Ibérica la región sureste siempre ha contado con un especial seguimiento en investigación, puesto que se considera zona de convergencia de las placas Euroasiática y Nubia (Nocquet y Calais, 2003). Este contacto se extiende desde las Islas Azores hasta el Estrecho de Gibraltar, para continuar hacia el este a través del sur de la Península Ibérica, el mar de Alborán y el norte de África (Buforn et ál., 2004). Los esfuerzos compresivos generados por la aproximación en los últimos millones de años de ambas placas, mantienen activos a ambos lados del Mar de Alborán los orógenos del Rif (norte de África) y la Cordillera Bética (sur de la Península Ibérica). Esta convergencia es la responsable, a su vez, de la sismicidad presente en la zona.

En la actualidad, la instalación de redes GNSS permanentes en el área ha facilitado además un mejor aprovechamiento de las técnicas geodésicas espaciales, proporcionando un registro temporal muy importante a la hora de estudiar la geodinámica de la zona. La ingente cantidad de datos derivados de estas redes abarcan, en muchos casos, un período de entre cinco y diez años de manera ininterrumpida, permitiendo el estudio de zonas donde anteriormente no existían trabajos con geodesia espacial, como es el caso del Archipiélago Balear.

La metodología ha tenido también una evolución pareja al progreso técnico informático desarrollado en las últimas décadas. El Posicionamiento Puntual de Precisión (PPP), basado en observables GNSS no diferenciados (Zumberge et ál., 1997a), se ha convertido en la actualidad en una herramienta con gran proyección. Esta metodología se fundamenta en la mejora de las variables de entrada del proceso de posicionamiento aumentando, por tanto, la calidad de los resultados. En investigación ha conseguido precisión milimétrica en el cálculo de coordenadas (Kouba, 2005; Smith et ál., 2004) y recientemente se han iniciado nuevas líneas de estudio con la obtención de campos de velocidad mediante series temporales (Teferle et ál., 2007) y su uso en deformación y tectónica (Fernandes et ál., 2007).

## 1.1. Objetivos

El objetivo fundamental de esta tesis doctoral es determinar la deformación actual en el sector oriental de la Cordillera Bética y en el Archipiélago Balear. Para ello se utilizarán datos GPS de estaciones permanentes a partir de series temporales, empleando el posicionamiento puntual de precisión PPP como técnica de procesado de datos.

Se pretende generar a partir de observaciones GPS continuas un campo de velocidades para las dos áreas de estudio, así como el cálculo de esfuerzos que determine la deformación en términos de compresión y extensión. Esta información completará los modelos tectónicos y geodinámicos en ambas zonas.

Los objetivos parciales que se pretenden alcanzar en este trabajo vienen resumidos en los siguientes puntos:

- Analizar y seleccionar las estaciones que formarán la red de monitorización de las dos zonas de estudio.
- Automatizar el proceso de obtención, control de calidad y procesado de las observaciones GPS.
- Validar las técnicas de Posicionamiento Puntual de Precisión PPP mediante software científico y servidores online via internet.
- Procesar las observaciones GPS de las estaciones permanentes de las zonas de estudio para determinar las coordenadas diarias.
- Calcular las velocidades absolutas y relativas a partir de las series temporales continuas de las estaciones.
- Estudiar los mapas de velocidad en el sector oriental de la Cordillera Bética y Archipiélago Balear en comparación con los modelos tectónicos teóricos disponibles.
- Estimar el tensor de deformación a partir del gradiente del campo de velocidades.
- Comparar el modelo de deformación obtenido con los procedentes de otras fuentes.
- Interpretar los resultados en términos de las estructuras tectónicas presentes en las zonas de estudio.

## 1.2. Contenidos de la tesis

La estructura general de esta tesis doctoral se encuentra dividida en 10 capítulos cuyo contenido se describe a continuación de manera resumida:

En el primer capítulo se incluyen las ideas generales sobre posicionamiento con geodesia espacial y su aplicación en el estudio de deformaciones. Contiene además las dos zonas de estudio, metodología y los objetivos que se pretenden alcanzar. A continuación, en el segundo capítulo, se hace una recopilación de los trabajos más importantes en este campo, a modo de antecedentes, centrándose en los estudios sobre geodinámica y tectónica a nivel mundial. Posteriormente, incluye las investigaciones más recientes en las dos zonas de estudio, el sector más oriental de la Cordillera Bética y el Archipiélago Balear.

Puesto que es de gran importancia el conocimiento de las características propias de ambas zonas de estudio, en el tercer capítulo se incluye la descripción geológica y tectónica, con la localización geográfica y las distintas subdivisiones en las que se pueden diferenciar atendiendo a su estructura y composición. Además se incluyen aspectos de sismicidad y tectónica que ayudan a una visión general del área.

En la determinación de velocidades y deformaciones con GPS la definición de un sistema donde referenciar las coordenadas obtenidas es imprescindible a la hora de poder establecer unas conclusiones correctas y extrapolables a otros trabajos. Es por ello que en el capítulo cuarto se presentan los conceptos más importantes sobre sistemas de referencia, los marcos actualmente vigentes y los parámetros de transformación entre ellos.

A continuación el capítulo quinto hace una descripción de las características de los distintos sistemas GNSS actualmente vigentes, presentando las ecuaciones de observación planteadas en el sistema GPS y los elementos que afectan a las observaciones y medidas. Este apartado permite contextualizar los parámetros y modelos que actualmente se aplican para depurar y mejorar la precisión en el cálculo de coordenadas.

El capítulo sexto se centra en todo lo relacionado con los procedimientos y programas informáticos utilizados. En primer lugar se hace una breve relación de las distintas técnicas de posicionamiento como preámbulo al Posicionamiento Puntual de Precisión PPP, objeto principal de esta tesis doctoral. presentándose también el modelo matemático y las técnicas más recientes para la resolución de ambigüedades. A continuación se incluyen los programas informáticos utilizados y los conceptos en el campo de las series temporales.

La descripción de las redes GNSS en las zonas de estudio son presentadas en el capítulo séptimo, con su distribución, instrumentación y monumentación.

Asimismo se incluyen los criterios de selección tomados para elegir las estaciones que van a participar en el trabajo de las que se encuentran disponibles.

Los aspectos relativos al proceso de cálculo se muestran en el capítulo octavo, con las fases de trabajo y la estimación de la deformación en las zonas de estudio. En este capítulo se incluye además una comprobación previa de la metodología y la estimación general de velocidades como eje central de todo el proceso.

A continuación, en los capítulos noveno y décimo se presentan por un lado la interpretación de estos resultados, enlazando con los trabajos previos, para seguir luego con una síntesis de las conclusiones obtenidas a lo largo de toda la investigación y los posibles trabajos futuros. El documento finaliza con la presentación de las referencias bibliográficas consultadas.



# 2

## Antecedentes

---

*“El ignorante afirma, el sabio  
duda y reflexiona”*

Aristóteles

### 2.1. Estudios de deformaciones desarrollados con geodesia espacial

Desde los primeros años en los que el GPS comenzó a utilizarse para calcular el posicionamiento de puntos sobre la superficie terrestre, el estudio de la deformación de la corteza fue uno de los campos con mayor desarrollo e investigación. En los últimos 30 años, en las áreas geográficas donde la tectónica de placas, la sísmica o la vulcanología ofrecían evidencias de actividad reciente mensurable, se han ido construyendo redes de observación GPS para la determinación de los parámetros de deformación, campos de velocidad y mapas de esfuerzos en estas zonas ([Allmendinger et ál., 2009](#)).

Al principio, debido al reducido número de receptores disponibles y la ausencia de estaciones permanentes en muchos lugares, el posicionamiento relativo con observaciones episódicas mediante redes GPS fue la dinámica general. Posteriormente, la combinación de este tipo de observaciones con los datos de estaciones permanentes cada vez más extendidas, el desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento de la señal como el Posicionamiento Puntual de Precisión y el empleo de tectonología espacial INSAR como complemento a las observaciones directas, han conseguido ampliar y mejorar los resultados e interpretaciones de la geodinámica a partir de datos espaciales.

Al calor de estos avances y en época reciente se han ido desarrollado multitud de trabajos geodésicos con la intención de definir y cuantificar la deformación en distintas zonas activas alrededor del globo.

En concreto, en el área de confluencia de las placas Euroasiática y las sucesivas microplacas adyacentes a la placa Pacífica, donde la subducción activa genera gran actividad sísmica y volcánica, se pueden resaltar los estudios desarrollados en el Archipiélago de Japón (Dzurisin, 2007; El-Fiky et ál., 1999; Savage et ál., 2010; Shestakov et ál., 2012; Yong et ál., 2011; Yoshioka y Matsuoka, 2013), zona noreste de Rusia, Península de Kamchatka e Islas Kuriles (Jin et ál., 2007; Timofeev et ál., 2012), costas orientales de China e Isla de Taiwán (Chang et ál., 2012; Chen et ál., 2013; Tsai et ál., 2012), Indonesia y Tailandia (Satirapod et ál., 2013; Som et ál., 2011; Tran et ál., 2013) y, más recientemente, en el área del Archipiélago de Filipinas (Galgana et ál., 2013; Yu et ál., 2013).

Por su parte, en el interior de la placa Euroasiática, la compresión continua de la Placa India, generadora de los relieves del Himalaya y la meseta del Tibet, la investigación con geodesia espacial se ha centrado sobre todo en la estimación de las magnitudes de elevación, deformación vertical y la comunicación al interior del continente de los sistemas de esfuerzos. Entre los trabajos más importantes en el área se pueden destacar los ejecutados en la zona de la Meseta del Tibet (Gan et ál., 2007; Ponraj et ál., 2010; Pradhan et ál., 2013; Zheng et ál., 2013), los enfocados en la dinámica del contacto próximo al Himalaya (Mahesh et ál., 2012; Verma y Bansal, 2012) y los que estudian áreas más alejadas de la convergencia, en el entorno del Lago Baikal, China y Mongolia (Lukhnev et ál., 2013, 2010; Wang et ál., 2008; Zhu y Shi, 2011).

En la zona de contacto de las placas Arábica, Euroasiática e India, la compleja tectónica existente, a la que se suma el proceso extensivo cercano del Rift Africano, ha sido foco de investigación continua en los últimos años con el objeto de cuantificar los esfuerzos corticales presentes. Cabe destacar los estudios desarrollados en áreas de Irán (Djamour et ál., 2011; Mousavi et ál., 2013; Nankali, 2011), la Península Arábica y el Mar Rojo (ArRajehi et ál., 2010; Reilinger y McClusky, 2011).

Otra área con fuerte actividad tectónica, sísmica y volcánica, perteneciente al Cinturón de Fuego del Pacífico, es la confluencia de las placas Norteamericana y Pacífica. Esta zona de subducción también cuenta con placas más pequeñas como la de Juan de Fuca y una compleja geodinámica. La característica más importante de este área es que dispone de trabajos con geodesia espacial prácticamente desde los inicios del uso del GPS en el ámbito de la investigación. Entre los estudios recientes más importantes se pueden destacar los desarrollados en California en el entorno de la Falla de San Andrés (Johanson y Burgmann, 2005; Lundgren et ál., 2009; Shen et ál., 1996; Tong et ál., 2012; Zeng y Shen, 2013), los que utilizan redes permanentes como la red CORS (Wang y Hu, 2013), los planteados

en áreas volcánicas del noroeste próximas al volcán Saint Helens (Dzurisin, 2007) y los trabajos en zonas de deformación en Alaska y las Islas Aleutianas (Antonelis et ál., 1999; Fu y Freymueller, 2013).

En América del Sur la subducción de la placa de Nazca y Cocos genera los relieves asociados a la Cordillera de los Andes y Centroamérica. Este área cuenta además con una actividad sísmica muy importante que se manifiesta en eventos de elevada magnitud. Entre los trabajos más importantes se pueden destacar los desarrollados en el área del Pacífico Mexicano (Franco et ál., 2005; Kostoglodov et ál., 2001), altiplano y Andes Centrales (Norabuena et ál., 1998), los que utilizan redes como la del observatorio geodésico TIGO y SIRGAS en Chile (Marotta et ál., 2013; Ruegg et ál., 2009; Vigny et ál., 2009) y los que se centran en investigar la deformación relacionada con la actividad sísmica tras eventos de gran magnitud, como el terremoto de Maue de 2010 en Chile (Bedford et ál., 2013). En el Golfo de México y las Antillas, zonas donde la actividad volcánica asociada a la placa del Caribe es destacada, se tienen también algunos trabajos reseñables (Jouanne et ál., 2011; Weber et ál., 2011).

Por su parte, en el área central de la Placa Pacífica cercana a las Islas Hawaii, se presentan zonas de actividad asociada a la presencia de puntos calientes. En este caso también existen numerosos estudios centrados en el cálculo de deformaciones sobre el edificio volcánico antes, durante y después de una erupción (Dzurisin, 2007; Myer et ál., 2008; Shirzaei et ál., 2013). De igual modo, en la confluencia de las placas Euroasiática y Norteamericana, y en áreas próximas a la dorsal Atlántica, la presencia de islas volcánicas en la región de la Macaronesia y Atlántico Norte han permitido desarrollar trabajos con observaciones GPS para estimar los valores de deformación y esfuerzos. Entre los estudios más destacados se pueden resaltar los ejecutados en las Islas Azores (Decriem y Árnadóttir, 2012; Marques et ál., 2013; Miranda et ál., 2012), Islandia (Perlt et ál., 2008), Islas Canarias (Berrocoso et ál., 2010; Sevilla y Martín, 1986; Sevilla et ál., 1996; Vieira et ál., 1986) y zona occidental del Estrecho de Gibraltar (Zitellini et ál., 2009). El objetivo principal de todos estos trabajos es definir parámetros y variables que, junto a los estudios sobre sísmica, geología y química de gases, permitan modelizar la actividad volcánica.

El continente europeo también dispone de una actividad investigadora intensa en este campo. Las áreas meridionales más expuestas a la deformación que conlleva su proximidad con la confluencia de las placas Euroasiática y Nubia son las que han focalizado muchas de las investigaciones. En la zona central, donde la actividad tectónica es mucho menor, el número de trabajos es sensiblemente inferior, como lo constatan los pocos estudios existentes sobre deformación en centroeuropa (Campbell y Nothnagel, 2010; Fuhrmann et ál., 2013; Tesauro et ál., 2006), Cordillera de los Alpes (Caporali et ál., 2013) y la Península Escandinava (Lidberg et ál., 2010; Nordman et ál., 2009), asociados sobre todo a la estimación de deformación vertical, tectónica regional e isostasia post-glaciar.

En el entorno del Mar Mediterráneo, por su parte, la zona oriental acumula gran cantidad de trabajos fruto de la compleja tectónica presente en el área. Los trabajos más recientes engloban sobre todo la Península de Anatolia (Aktug et ál., 2013b; Aktuğ y Kilic, 2006; Karakhanyana et ál., 2013; Ozener et ál., 2010, 2013a,b; Tatar et ál., 2012), la región del Cáucaso y Azerbaiyán (Aktug et ál., 2013a; Milyukov et ál., 2010), la Península de los Balcanes (Caporali et ál., 2009; Jouanne et ál., 2012), Egipto y Península del Sinaí (Mohamed et ál., 2013; Rayan et ál., 2010), la región de Palestina (Mahmoud et ál., 2013; Palano et ál., 2013b; Reinking et ál., 2011) y la zona de Grecia y el Mar Egeo (Chousianitis et ál., 2013; Ganas et ál., 2013; Hollenstein et ál., 2008; Mitsakaki et ál., 2013; Muller et ál., 2013). Algunos trabajos además combinan los estudios geodésicos con otros basados en datos sísmicos (Rontogianni, 2010; Stiros et ál., 2013), apoyados en ocasiones con técnicas espaciales basadas en radar como INSAR (Lagios et ál., 2012).

En la zona del Mediterráneo central un gran número de investigaciones se han centrado en el estudio de la convergencia entre placas (Viti et ál., 2011) y en el vulcanismo presente en Italia y Sicilia (Serpelloni et ál., 2010). Los trabajos más destacados en este campo se enfocan en el estudio de edificios volcánicos como el Etna (Bonforte y Guglielmino, 2008; Currenti et ál., 2011; Lagios et ál., 2013; Palano et ál., 2008). En la Península Italiana, por su parte, el área cercana a los Apeninos, con una sismicidad regional destacada, posee redes de observación GPS que han permitido cuantificar los parámetros y deformación existentes (Barba et ál., 2010; Bus et ál., 2009; Cenni et ál., 2012; D'Agostino et ál., 2009; Devoti et ál., 2011, 2008).

## 2.2. Estudios planteados en las zonas de trabajo

En el área de convergencia de la placa Euroasiática y Nubia, el sector más occidental del Mediterráneo ha sido objetivo de numerosos estudios geodésicos a lo largo de los años. Esto es debido a que los trabajos geológicos y sísmicos ya determinaban la presencia de actividad reciente en las fallas y estructuras de la zona (Keller et ál., 1996; Sanz de Galdeano, 1996). Los estudios comenzaron con trabajos puramente geométricos y de nivelación en el año 1984 en el área del Estrecho de Gibraltar, que se fueron completando con los desarrollados mediante campañas episódicas GPS en la década de 1990 (IGN, 1984). En paralelo a estas operaciones se comenzaron a realizar nivelaciones en la zona de los Pirineos orientales impulsadas por el Institut Cartogràfic de Catalunya con el objeto de cuantificar la actividad tectónica (Giménez, 1993; Giménez et ál., 1996; Talaya et ál., 1999; Térmens et ál., 2000).

Los primeros trabajos con datos GPS que analizaban el área de confluencia Eurasia-Nubia en torno al Mar de Alborán se iniciaron con campañas de observa-

ción episódica (Fernandes et ál., 2003; McClusky et ál., 2003; Nocquet y Calais, 2003, 2004). Algunos trabajos pusieron de manifiesto la deformación existente cuantificándola mediante campañas con GPS diferencial durante los años 1999, 2000 y 2002, mostrando una tasa de deformación acorde con las hipótesis geológicas existentes (Alfaro et ál., 2006). En la misma línea se desarrollaron estudios en los que participaron instituciones como el Real Observatorio de la Armada de San Fernando (ROA) mediante la creación de la red CuaTeNeo (Castellote et ál., 2000; Gárate et ál., 2006; Khazaradze et ál., 2006) y la observación de zonas localizadas en la Cordillera Bética y norte de África mediante campañas episódicas (Pérez-Peña, 2007).

Esta zona posee además un elevado número de fallas activas que han tenido actividad sísmica en época reciente (Martínez-Díaz et ál., 2002; Tahayt et ál., 2009). Algunos estudios de investigación se han centrado en la monitorización de deformaciones de estas estructuras geológicas mediante redes de observación GPS con campañas puntuales, impulsados sobre todo por instituciones y grupos financiados a cargo de diversos proyectos de investigación. Entre los grupos con una actividad predominante en este campo cabe destacar el de Microgeodesia de la Universidad de Jaén (RNM282), que cuenta con producción científica relacionada al estudio de fallas activas con geodesia clásica y espacial (Borque, 2008; Galindo-Zaldívar et ál., 2013; Gil et ál., 2011, 2002, 1999; Marín-Lechado et ál., 2010; Ruíz et ál., 2003, 1999; Sousa et ál., 2010).

El Archipiélago Balear, por su parte, no ha contado con trabajos de geodesia espacial específicos en los últimos años. Esto se debe principalmente a que la actividad tectónica y sísmica que se presenta en el archipiélago es considerablemente menor a la que existe en la Cordillera Bética y zonas cercanas. Generalmente los trabajos se han enmarcado en el estudio global del contacto Nubia-Eurasia dentro de la Península Ibérica y norte de África. Únicamente se pueden destacar algunos estudios geológicos que se centran en la investigación de la dinámica de determinadas fallas y estructuras presentes en la isla de Mallorca (Gelabert et ál., 2005; Giménez, 2003; Giménez et ál., 2002; Silva et ál., 2004) así como en la tectónica general de la zona marítima circundante en el promontorio Balear (Acosta et ál., 2004, 2002, 2001) y cuencas adyacentes (Dañobeitia et ál., 1992; Roca, 1992).

Un ejemplo de estudio de deformación con observaciones GPS en la parte meridional del contacto Iberia-Nubia se describe en (Fadil et ál., 2006). En este caso la investigación se centra preferentemente en el lado marroquí del contacto entre placas, en concreto realiza el procesado de 22 vértices con campañas episódicas, 4 estaciones de observación continua y 4 estaciones internacionales localizadas en la Península Ibérica. El intervalo de trabajo se extiende durante 5 años, incluyendo campañas en los años 1999, 2001, 2002 y 2004. Para el cálculo de las coordenadas utilizan el marco de referencia ITRF2000 con el software de procesado GAMIT/GLOBK en modo relativo. El mapa de velocidades obtenido en la zona y las elipses de error calculadas al 95 % se describen en la figura 2.1.

## 2.- Antecedentes

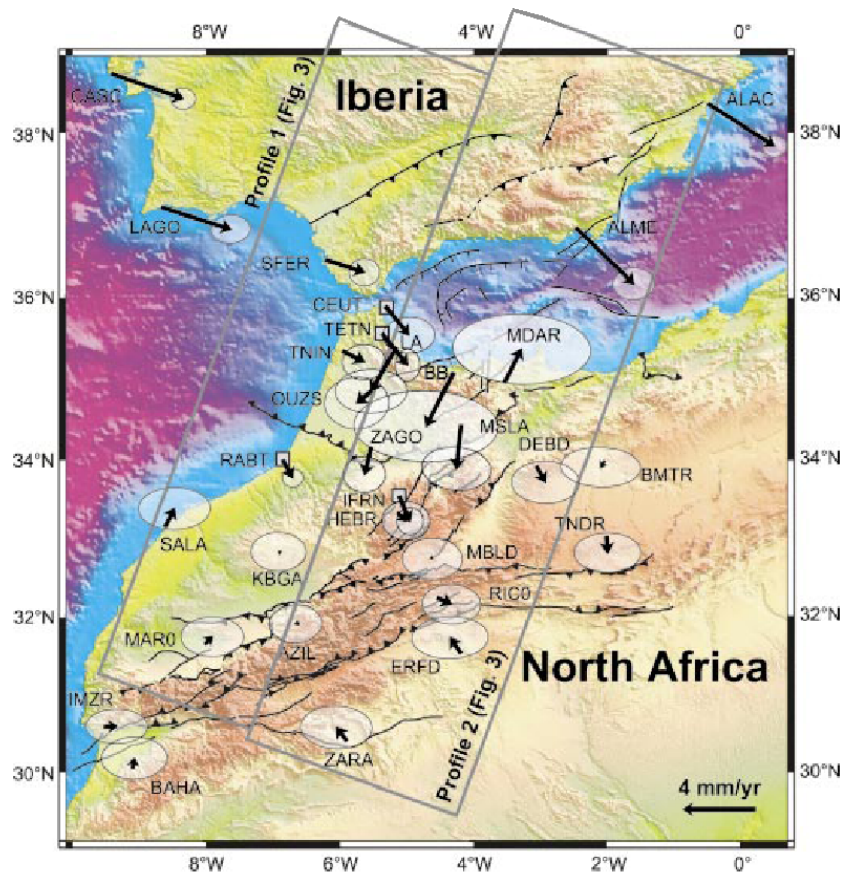


Figura 2.1: Campo de velocidades relativas a la placa Nubia con elipses al 95 % de confianza. Fuente [Fadil et ál. \(2006\)](#)

Los resultados más destacados de este trabajo evidencian un desplazamiento de la zona del Rif marroquí hacia el sur, con un valor estimado respecto a la parte estable de la placa Nubia de 3 mm/año. Este dato sería consistente con un acortamiento de la zona del Rif y vendría asociado también a la subsecuente extensión cortical en el área del Mar de Alborán situada más al norte. Según [Fadil et ál. \(2006\)](#), este proceso se explicaría por la dinámica superior del manto relacionada con la continua convergencia entre ambas placas. Las 13 estaciones de este trabajo localizadas al sur de la Cordillera del Rif tienen unas velocidades GPS consistentes con el movimiento general de la placa Nubia al 95 % de confianza, lo que aclara la pertenencia de éstas a Nubia en sentido geodinámico. A partir de aquí el trabajo plantea el modelo que mejor se ajusta a sus observaciones geodésicas, llegando a la conclusión de la existencia de una retracción de la lámina que subduce (*roll-back*) bajo la zona del Rif y el Mar de Alborán.

Sus conclusiones concuerdan con los indicadores geológicos que muestran una activa deformación neotectónica en la zona. Los desplazamientos relativos obtenidos con el modelo en el área del Rif tendrían una magnitud de 4 – 6 mm/año,

consistentes con los índices reportados en estudios anteriores sobre fallas activas del área. Como comprobación de las magnitudes obtenidas, el estudio estima que, considerando una extensión constante en dirección NNE-SSW de 4,5 mm/año en la zona, la cuenca de Alborán se habría formado hace 31 Ma, lo que estaría de acuerdo con las estimaciones geológicas previas que la sitúan hace 27 Ma.

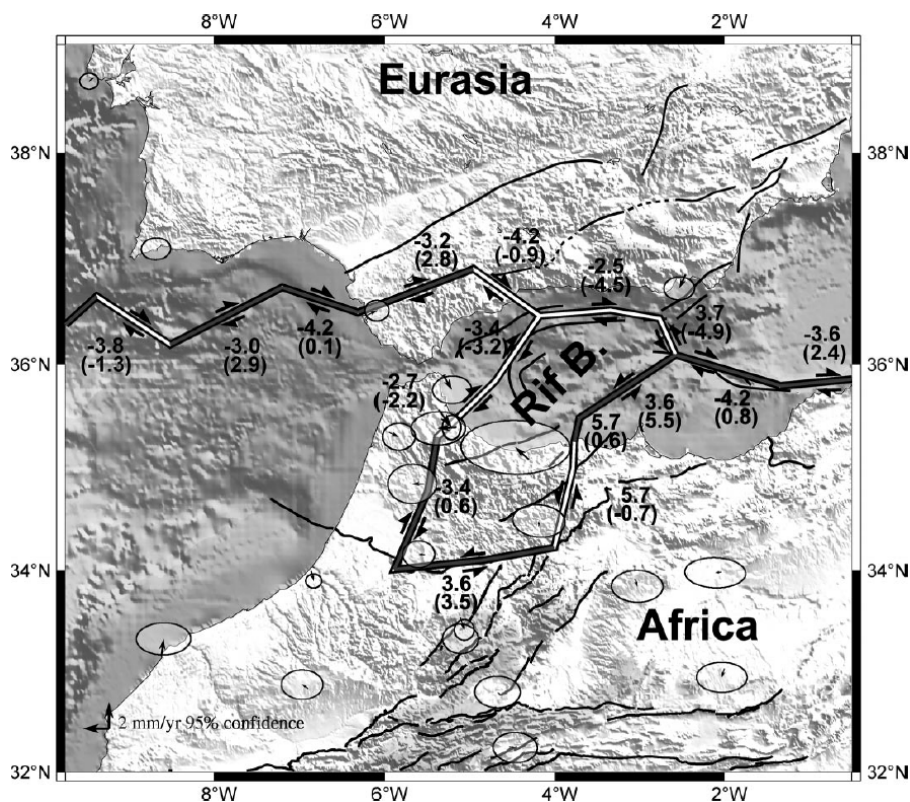


Figura 2.2: Modelo elástico de bloques de la convergencia Iberia-Nubia. Los valores numéricos indican los saltos de las distintas fallas en el modelo planteado. Fuente [Fadil et ál. \(2006\)](#)

Como novedad establece una mayor complejidad en el contacto de placas en la zona, con un bloque independiente situado sobre el Rif y el Mar de Alborán distinto al principal de las placas Euroasiática y Nubia. Este bloque seguiría una dinámica de transición en los valores de velocidad (Figura 2.2).

En paralelo al trabajo anterior, [Stich et ál. \(2006\)](#) desarrollaron un estudio mixto, con datos geodésicos y sísmicos. Concretamente trabajaron con 86 tensores sísmicos de terremotos ocurridos en la zona de convergencia de Iberia-Nubia con magnitud comprendida entre 3,3 y 6,9. Incluyeron además observaciones GPS comprendidas entre 1998 y 2005 sobre un grupo de estaciones pertenecientes a las redes EPN-EUREF, UNAVCO, la red de la Agencia Espacial Italiana y el proyecto TYGEONET.

## 2.- Antecedentes

Los fundamentos de cálculo en este trabajo son, por un lado, el establecimiento de un marco homogéneo para las coordenadas en ITRF2000 y, por otro, el procesado en modo relativo con el software GAMIT/GLOBK siguiendo los procedimientos estándares de redes regionales. Puesto que durante el período de observación no ocurrieron terremotos reseñables cercanos a las estaciones GPS de las zonas de estudio, no se definieron saltos debido a la actividad sísmica. De este modo el campo de velocidades combinadas se puede considerar como representativo en desplazamientos de largo período, comparándolo con los índices de convergencia de placa derivados de modelos teóricos.

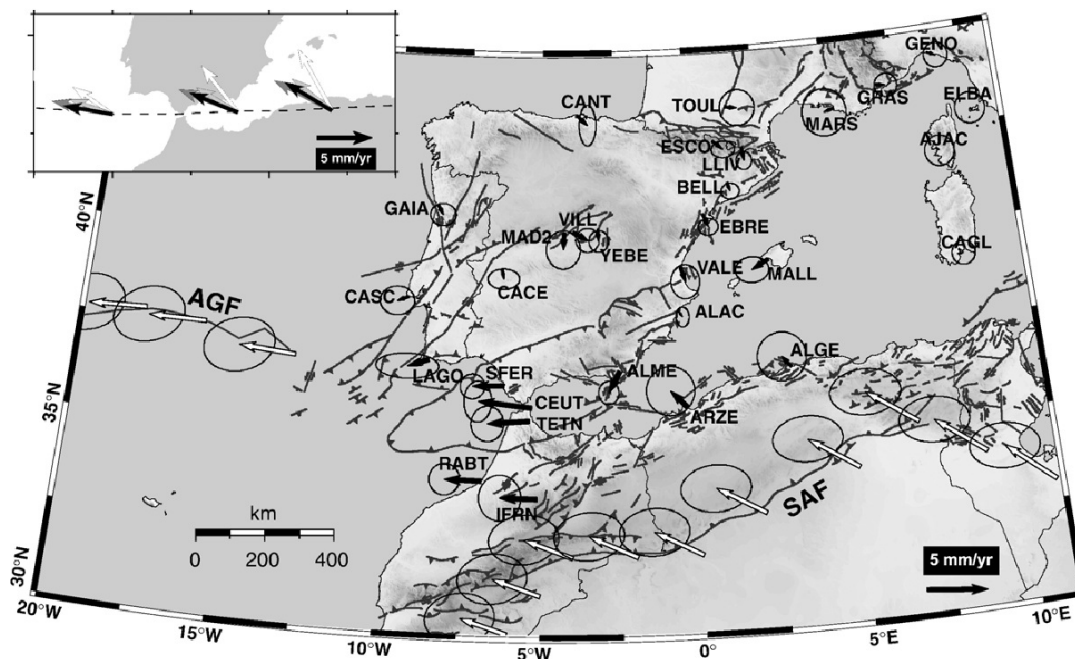


Figura 2.3: Campo de velocidades de la convergencia Iberia-Nubia. Las flechas están definidas en mm/año relativas a la parte estable de la placa Euroasiática con las elipses al 95%. Fuente [Stich et ál. \(2006\)](#)

El estudio destaca el desplazamiento hacia el oeste de algunas estaciones situadas en las zonas activas del Arco de Gibraltar como son Ceuta (CEUT), San Fernando (SFER) y Tetuán (TETN), con variaciones de entre 2,6 y 4,4 mm/año respecto a la parte estable de la placa Euroasiática. Asimismo detecta diferencias de 1 mm/año entre las estaciones de SFER y Lagos (LAGO), lo que implica un esfuerzo acumulado en esa zona de convergencia (Figura 2.3).

Una de las conclusiones definidas para explicar el movimiento diferencial de la región Bético-Rifeña respecto a las zonas circundantes, es la consideración de la placa Nubia como un bloque que no sigue un comportamiento rígido y homogéneo. Indica además que el comportamiento hacia el oeste del flujo del manto superior puede ser el responsable de la tracción del área meridional de la región, lo que se vería reflejado en la velocidad de los puntos con GPS. Los movimientos diferenciales y la deformación interna de todo el dominio puede ser vista, por tanto, como consecuencia de procesos de dinámica subcortical a escala regional, involucrando diversos escenarios para el reciclado del material litosférico en el manto superior.

Los resultados numéricos obtenidos con GPS concuerdan a su vez con los calculados con métodos sísmicos. Por un lado las zonas interiores de la Península Ibérica revelan un movimiento menor en concordancia con la baja sismicidad y, por otro, se aprecia el giro contrario a las agujas del reloj en la rotación de la placa Nubia que se acomoda a lo largo de todo el norte de África. El acortamiento estimado es de aproximadamente 3 mm/año en Argelia y de 2 mm/año en el Atlas Marroquí. En la zona del dominio de Alborán se aprecia un campo de velocidades en el sentido de las agujas del reloj, más acusado cuanto más cerca del Arco de Gibraltar, en consonancia con los comportamientos geológicos observados.

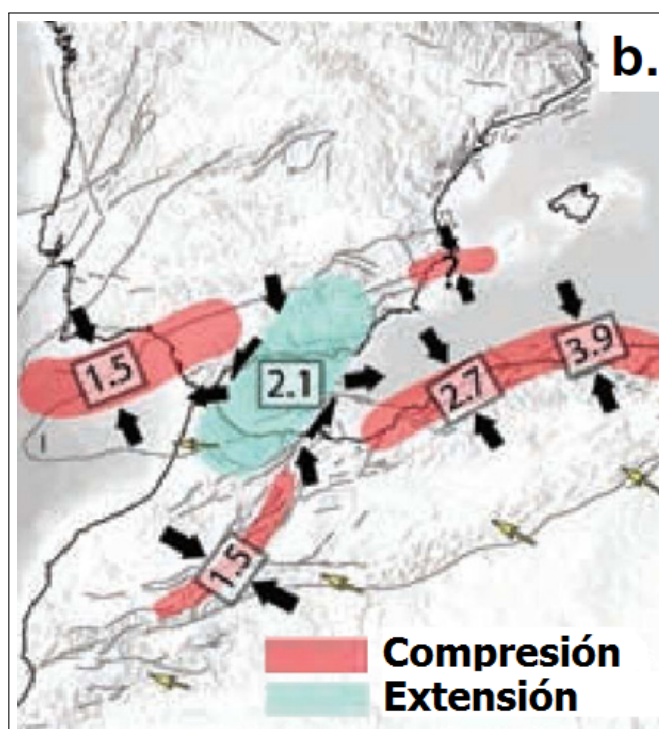


Figura 2.4: Mapa de esfuerzos en la convergencia Iberia-Nubia. Las áreas en rojo muestran predominancia de compresión y las azules de extensión. Los valores numéricos están estimados en mm/año. Fuente [Serpelloni et ál. \(2007\)](#)

Como novedad, [Serpelloni et ál. \(2007\)](#) realizaron un trabajo con la participación de datos GPS en un intervalo que supera los 14 años, en combinación con valores de sísmica y diversas estaciones permanentes. Su objetivo principal era determinar la cinemática y tectónica actual en la región de convergencia Iberia-Nubia, con una densidad de información superior a la que se tenía hasta entonces. En concreto amplía la zona de estudio al oeste del Estrecho de Gibraltar conteniendo no solo el Mar de Alborán, sino también la convergencia hacia la dorsal Atlántica.

Los datos iniciales de esta investigación combinan observaciones de estaciones permanentes GPS presentes en la zona de estudio junto a observaciones episódicas realizadas en el intervalo 1991-2005. Al aumentar el rango y densidad de las localizaciones se consiguió generar un campo de velocidades global y homogéneo para el área del Mediterráneo occidental a uno y otro lado del Estrecho de Gibraltar. Además, puesto que incluye los mecanismos focales, permite estudiar la deformación sísmica y relacionarla con la detectada con GPS.

Sus resultados indican que la deformación simple al oeste del Estrecho de Gibraltar, caracterizada con áreas de extensión perpendicular a la dorsal Atlántica y movimientos asociados a la falla transformante de Gloria, se convierte en un comportamiento de deformación más complejo en la zona oriental. Su primera conclusión es definir una subdivisión dentro de la convergencia de placas con segmentos de compresión E-W al suroeste de Iberia y Norte de Argelia, con la predominancia de extensión en el área del Rif, Alborán y Cordillera Bética (Figura 2.4).

La explicación de la compleja tectónica que presenta la zona estaría derivada de la existencia de estructuras previas en forma de microplacas, relacionadas directamente con la evolución tectónica del Mar Mediterráneo desde su origen, y con intervención de distintos procesos de compresión y extensión que englobarían la subducción de parte de litosfera.

Otro trabajo que aporta novedades importantes a la hora de determinar la deformación en esta zona es el presentado por [Fernandes et ál. \(2007\)](#). Este estudio tiene la característica de enfocarse, no solo en la parte del contacto de placas al sur de la Península Ibérica, sino que también abarca más al norte llegando incluso al sur de Francia. La importancia de este estudio radica además en el uso de estaciones permanentes con observación continua así como en el empleo de la técnica de posicionamiento PPP. Todos estos aspectos hacen de este trabajo un estudio novedoso y de importancia, ya que introduce variantes que hasta ese momento no se habían considerado en la zona.

En este caso los datos disponibles pertenecían a estaciones situadas en la Península Ibérica, Francia y norte de África, con un intervalo de tiempo de observación continua de al menos 3,5 años. Las estaciones utilizadas están enmarcadas

en la red GEODAC, que cuenta con 40 estaciones en la Península Ibérica (6 en Portugal y 34 en España), 3 en Marruecos y 2 en el sur de Francia. Las observaciones fueron procesadas mediante Posicionamiento Puntual de Precisión PPP utilizando el paquete GIPSY-OASIS, obteniendo las series temporales de posiciones respecto al marco ITRF2000. Las estimaciones de velocidad obtenidas a partir de las series temporales fueron comparadas posteriormente con modelos teóricos como el NNR-NUVEL1A (DeMets et ál., 1994) y el DEOSVel (Fernandes et ál., 2003), basados en datos geológicos y geodésicos respectivamente. Como aspecto a destacar en la metodología, comentar que el estudio hace especial hincapié en la necesidad de tomar un intervalo de tiempo de al menos 3,5 años, para evitar variaciones estacionales como efectos sobre la señal debido a periodicidades.

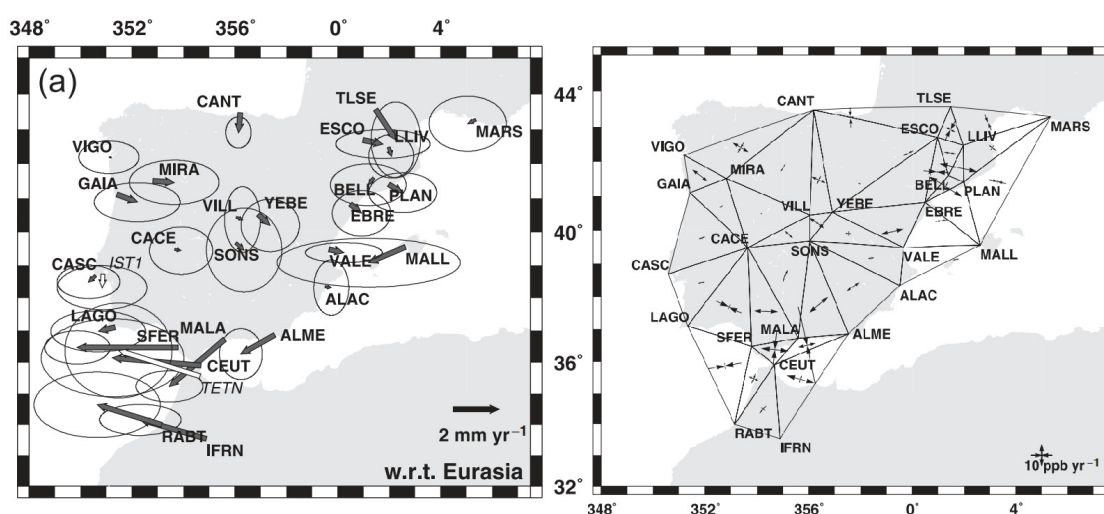


Figura 2.5: Campo de velocidades de la convergencia Iberia-Nubia a partir de las soluciones de la red GEODAC respecto a la placa Euroasiática por el modelo DEOSVel (izquierda) y esfuerzos calculados en base a la triangulación planteada (derecha). Elipses al 95% de confianza. Fuente Fernandes et ál. (2007)

Los resultados confirman que la Península Ibérica forma un bloque fijo respecto a Eurasia, obteniéndose además unos errores asociados de 0,85 mm/año para Iberia y 0,70 mm/año para el norte de Marruecos. El trabajo muestra la preeminencia del desplazamiento solidario con la placa Nubia en algunas estaciones del sur de la Península, con un movimiento hacia el oeste con diferencias de hasta 4,4 mm/año respecto a la parte estable de Eurasia. Los resultados obtenidos están por encima de las estimaciones de error a priori, lo que sería determinante a la hora de una buena interpretación (Figura 2.5). Además llega a la conclusión de que este comportamiento no sería consecuencia únicamente de la convergencia de placas, sino que también puede responder a procesos litosféricos más complejos asociados al dominio de Gibraltar.

Una de las conclusiones más importantes de este trabajo es la comprobación de la técnica PPP a la hora de generar velocidades a partir de series temporales

## 2.- Antecedentes

continuas de datos GPS. Esta técnica permite la determinación de valores de velocidad sin un ajuste de red, como ocurre en posicionamiento relativo, lo que incide directamente en la precisión a la hora de calcular las deformaciones.

Otro estudio que abarca la zona meridional del contacto Nubia-Eurasia es el presentado por (Tahayt et ál., 2008). En este caso se combinan medidas GPS obtenidas a partir de observaciones en campañas realizadas desde 1999 a 2005 con procesado relativo, añadiendo además los datos de sismicidad en el entorno de la región Bético-Rifeña para evaluar los procesos sismotectónicos actuales en el área de convergencia.

Sus resultados evidencian movimientos asimétricos en el complejo de Alborán, en concordancia con los trabajos anteriores, y concluye que responden a la acomodación entre las placas Euroasiática y Nubia. Otra conclusión del trabajo es el desplazamiento hacia el sureste de la Cordillera Bética y el sur de la Península Ibérica respecto al norte de África, deduciendo además la división del Rif en tres bloques distintos con desplazamientos relativos.

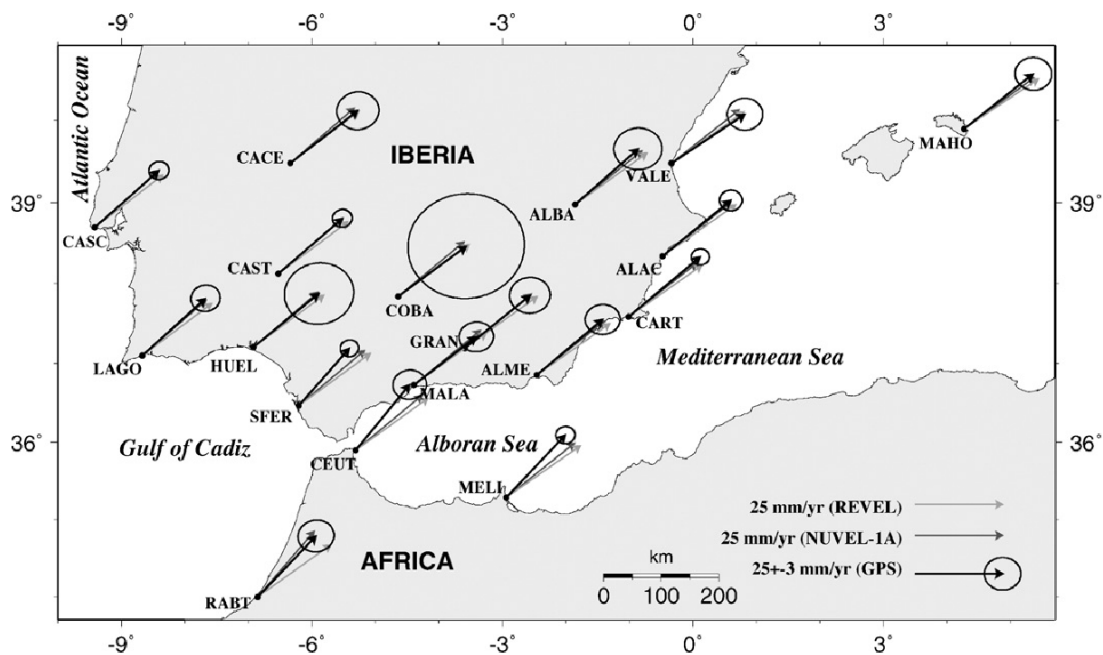


Figura 2.6: Campo de velocidades de la convergencia Iberia-Nubia. Las soluciones están en el marco de referencia ITRF2000 al 95 % de confianza y según las velocidades teóricas NNR-NUVEL1A y REVEL. Fuente Pérez-Peña et ál. (2010)

En los últimos años el intervalo cada vez mayor entre las observaciones episódicas ha permitido trabajos a largo plazo con períodos de tiempo próximos a los 10 años. Este es el caso de los estudios descritos en Pérez-Peña et ál. (2010), como continuación y ampliación de los realizados por el Real Observatorio de la Armada (ROA) en años anteriores (Pérez-Peña, 2007). En este caso se observaron

12 estaciones durante 8 campañas de campo que se prolongaron durante 7 años, entre 1998 y 2005. A los vértices con observación episódica se añadieron además los datos de estaciones permanentes de la región, aunque cubriendo únicamente el intervalo de cada campaña. El proceso de cálculo, realizado con el software Bernese 4.2, determinó el campo de velocidades relativas GPS en ambas orillas del Estrecho de Gibraltar, generando a su vez el modelo de deformación asociado con el mapa de esfuerzos. Las velocidades fueron comparadas posteriormente con los modelos teóricos NNR-NUVEL1A y REVEL.

Los resultados obtenidos determinan unas velocidades residuales respecto a la parte estable de Eurasia de aproximadamente 4,1 mm/año en dirección NW-SW a NNW-SSE en la zona del Golfo de Cádiz; magnitudes de en torno a 4,4 mm/año en NW-SE en la zona de la Cordillera Bética, Mar de Alborán y Norte de Marruecos y de 2,3 mm/año en dirección N-S en el área más oriental de la Península Ibérica. Sus resultados concuerdan con la rotación en sentido contrario a las agujas del reloj de la placa Nubia, ya indicado en trabajos anteriores (Figura 2.6). El trabajo también constata la reducción de las desviaciones respecto a los modelos teóricos de las estaciones situadas en el interior de la Península Ibérica, más alejadas de la zona de convergencia Iberia-Nubia, con movimiento solidario a la placa Euroasiática.

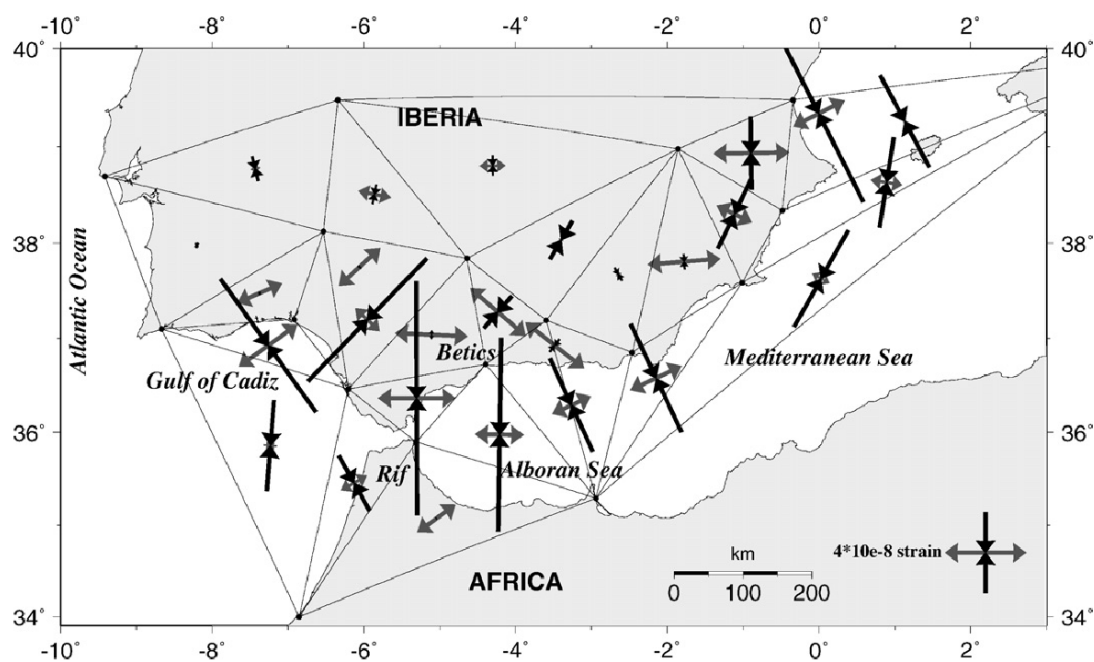


Figura 2.7: Mapa de esfuerzos de la convergencia Iberia-Nubia. Magnitudes definidas en  $\mu$ strain/año. Fuente [Pérez-Peña et ál. \(2010\)](#)

Respecto a los esfuerzos calculados, el estudio pone de relieve el predominio de un proceso compresivo sobre el Golfo de Cádiz en dirección NNW-SSE, con

## 2.- Antecedentes

valores de 3,5 mm/año, que va rotando hacia el N-S en la zona más oriental. El área del Mar de Alborán, Norte de Marruecos y la Cordillera Bética, por su parte, está caracterizada por un acortamiento de aproximadamente 2,2 mm/año en dirección NW-SE, junto a una extensión en WSW-ENE con valores de 3,7 mm/año, siendo este proceso extensivo predominante en el área (Figura 2.7).

Asimismo estima que la compresión detectada es más acusada en el norte de Marruecos, coincidiendo con la región cercana de Al Hoceima, y explicada por la propia convergencia entre las placas. En relación a la magnitud de los esfuerzos, el trabajo llega a la conclusión de que el régimen extensivo es más significativo que el compresivo en toda la zona. Además, Como medio de verificación de los resultados, establece una comparación con el grado de deformación sísmica calculado en otros estudios.

Paralelamente al trabajo anterior, [Vernant et ál. \(2010\)](#) estudian el comportamiento cinemático del contacto entre las dos placas principales pero, en esta ocasión, dando un mayor peso a las estaciones permanentes. Las observaciones se centraron en distintas áreas de Marruecos y sur de España, siempre en torno al Estrecho de Gibraltar. Como base contó con la ayuda de un total de 15 estaciones permanentes GNSS con observación continua, algunas de ellas pertenecientes a la red EPN-EUREF, y 31 vértices observados con campañas episódicas. El software elegido para el procesado fue GAMIT/GLOBK, que ya por entonces poseía una buena aceptación en muchos artículos de investigación para procesados en relativo ([Herring et ál., 2010](#)).

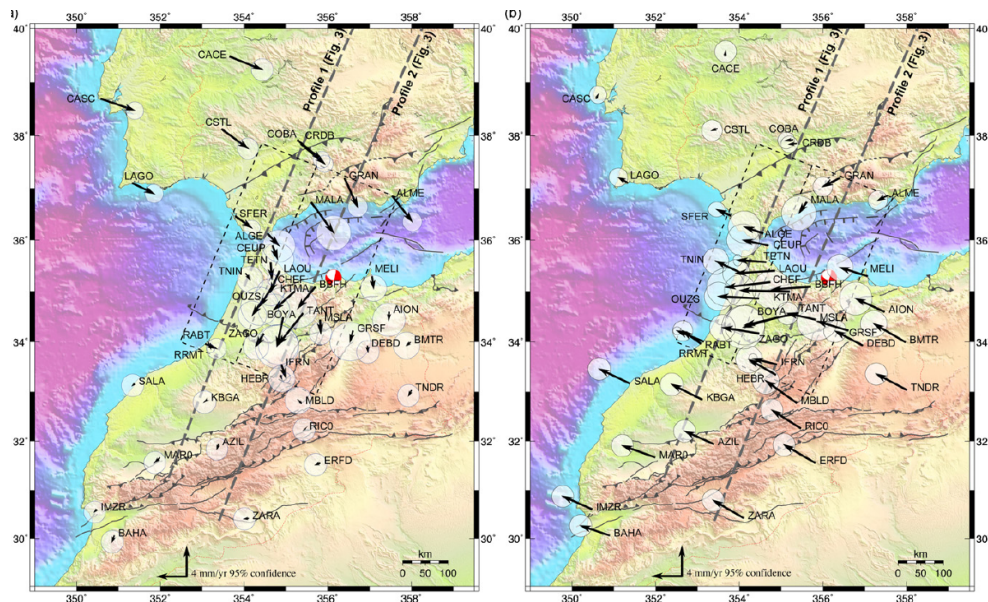


Figura 2.8: Campo de velocidades residuales en la convergencia Iberia-Nubia estimadas respecto a Nubia (izquierda) y Eurasia (derecha) al 95 % de confianza. Fuente [Vernant et ál. \(2010\)](#)

Este trabajo llega a una serie de conclusiones relativas al régimen de deformación en la zona de convergencia. En primer lugar comprueba la existencia de un régimen compresivo en la zona del Norte de África, al igual que constatan los trabajos anteriores, con magnitudes superiores a 1,5 mm/año al 95 % de confianza. Asimismo obtiene una tendencia general de desplazamiento hacia el sur del Rif que excede los 5,0 mm/año de magnitud. Este movimiento se considera relacionado con la apertura del mar de Alborán durante el Mioceno. En segundo lugar, el trabajo también observó un desplazamiento WNW de la Cordillera Bética al Norte del Mar de Alborán respecto a Eurasia. La magnitud de este movimiento estaría entre 1 – 2 mm/año y se describe en la figura 2.8. También plantea que la parte más meridional de las Béticas y la zona del Rif tienen una deformación observada que es solidaria entre ellas, asociada a su vez con el movimiento relativo entre las placas.

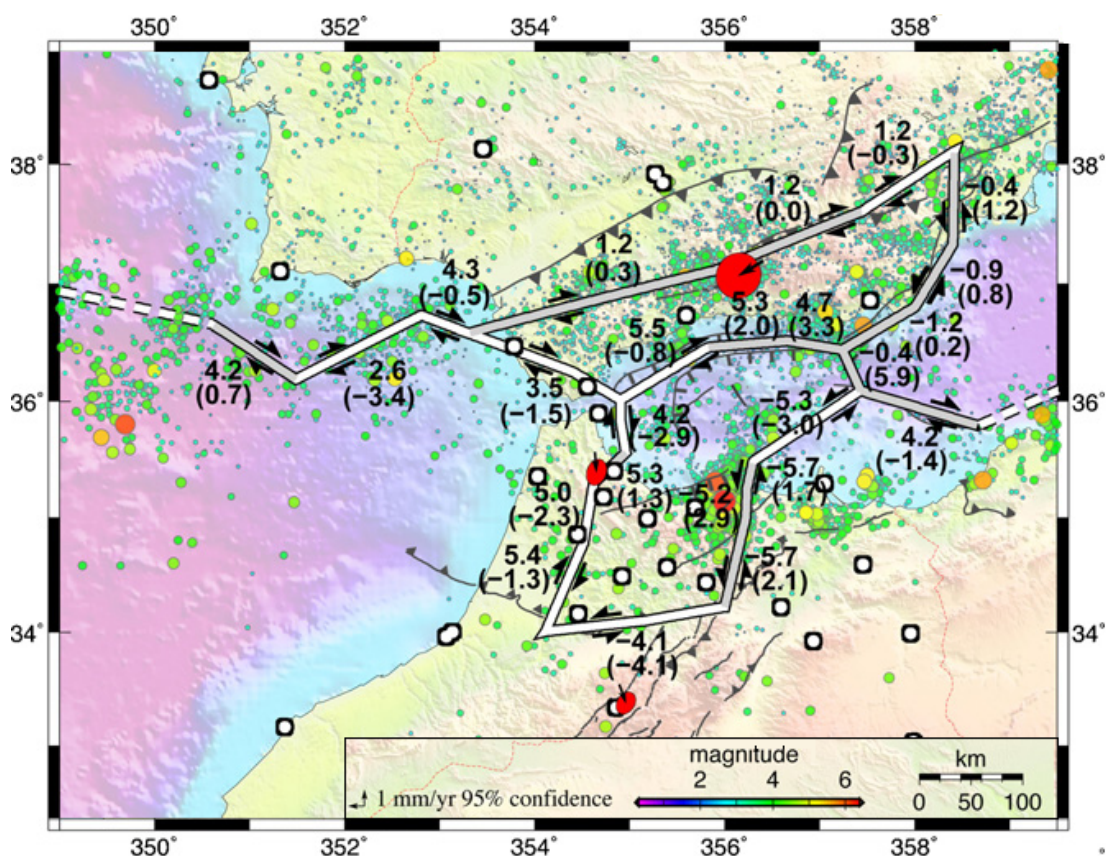


Figura 2.9: Modelo de convergencia de las placas Eurasia-Nubia con la localización de los seismos, fallas y desplazamientos principales. Fuente [Vernant et ál. \(2010\)](#)

Por todo ello, el trabajo considera que el contacto entre las placas Euroasiática y Nubia en el área del Estrecho cuenta con una alta complejidad, fruto de la interacción entre ambas placas durante millones de años. El modelo cinemático que calcula demuestra a su vez la existencia de dos bloques adicionales que incluyen

el bloque Alborán-Rif y el correspondiente a la Cordillera Bética (Figura 2.9). Estos bloques serían independientes respecto a la deformación y comportamiento de ambas placas principales. Como explicación del desplazamiento hacia el sur observado en la zona del Rif, el trabajo lo relaciona con una corriente del manto terrestre inducido por la existencia de un proceso de subducción.

Otro trabajo interesante es el descrito en [Koulali et ál. \(2011\)](#), donde las principales características que lo diferencian de los estudios anteriores es la densificación de estaciones en el sector oriental de la Cordillera Bética y la utilización de un número muy elevado de puntos en la zona de convergencia (cerca de 100), siendo la cifra de estaciones permanentes muy superior a los vértices que se midieron con campañas episódicas. Esta última característica será cada vez más común en los trabajos recientes, con la presencia más habitual de redes de estaciones permanentes GNSS.

En total se consideraron las observaciones de 65 estaciones continuas y 31 vértices con campañas episódicas, procesados todos ellos con el software GAMIT/GLOBK en modo relativo. El objetivo principal de este estudio era la generación de un modelo cinemático global, que abarcara una superficie mayor de la parte más occidental del contacto entre placas, junto a la estimación de un campo de velocidades GPS lo suficientemente denso. Los resultados ampliaban en tiempo y espacio los trabajos previos realizados por [Fadil et ál. \(2006\)](#) y [Vernant et ál. \(2010\)](#) lo que permitía una interpretación más global de los mismos. El campo de velocidades residuales calculado respecto a las placas Nubia y Eurasia se incluye en la figura 2.10.

Al igual que en trabajos anteriores, [Koulali et ál. \(2011\)](#) también detectaron un desplazamiento hacia el suroeste en la parte central del Rif de Marruecos respecto al movimiento principal de la placa Nubia. En este caso lo cuantifican entre 3,5 – 4,0 mm/año. Respecto a los puntos y estaciones situados en la Cordillera Bética, se observó un desplazamiento hacia el WSW respecto a Eurasia con una magnitud de entre 2 – 3 mm/año. Según sus propias conclusiones, esto es coherente con una transferencia parcial del movimiento de la zona norte de la placa Nubia hacia la parte más meridional de las Béticas, lo que confirma lo descrito en trabajos previos con la definición de varios bloques entre ambas estructuras principales (Figura 2.11). Además, tanto las regiones del Rif como el área suroccidental de la Cordillera Bética, tienen un comportamiento de rotación en el sentido de las agujas del reloj, que queda reflejado en el modelo cinemático.

Para la consistencia de los resultados, se incluyeron también estudios sísmicos y de dinámica de fallas en superficie para estimar la geometría y esfuerzos acumulados. Todos estos trabajos llegan a la conclusión de una cierta concordancia de la geodinámica de bloques planteada con la ocurrencia de seismos de elevada magnitud, como los acaecidos en Al Asnam en 1980 y Al-hoceima en 2004.

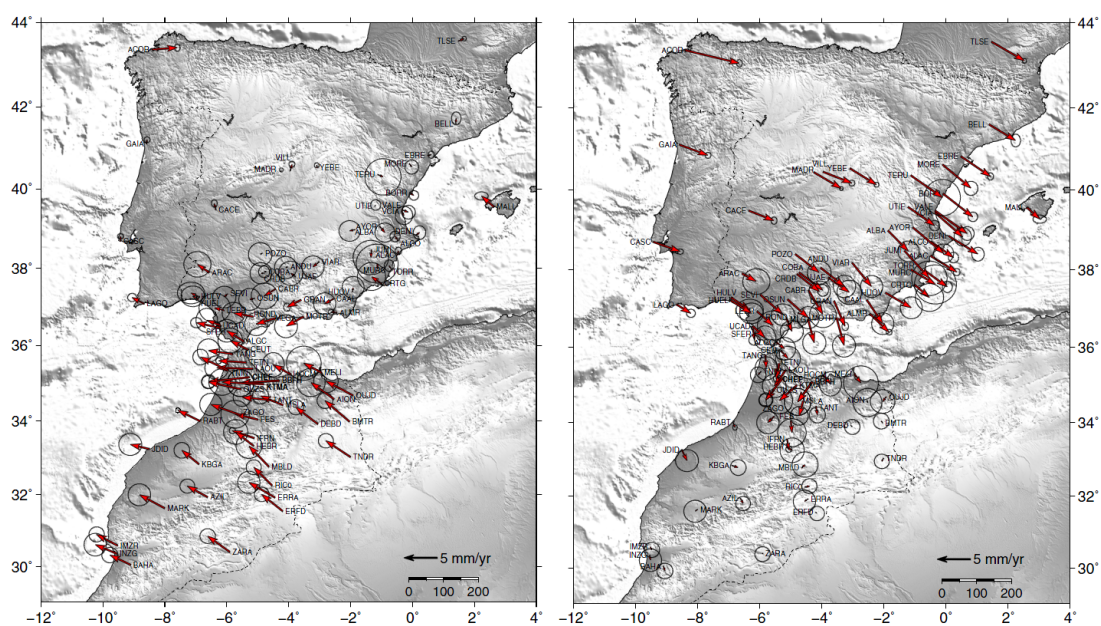


Figura 2.10: Campo de velocidades residuales en la convergencia Iberia-Nubia estimadas respecto Eurasia (izquierda) y Nubia (derecha) al 95 % de confianza. Fuente [Koulali et ál. \(2011\)](#)

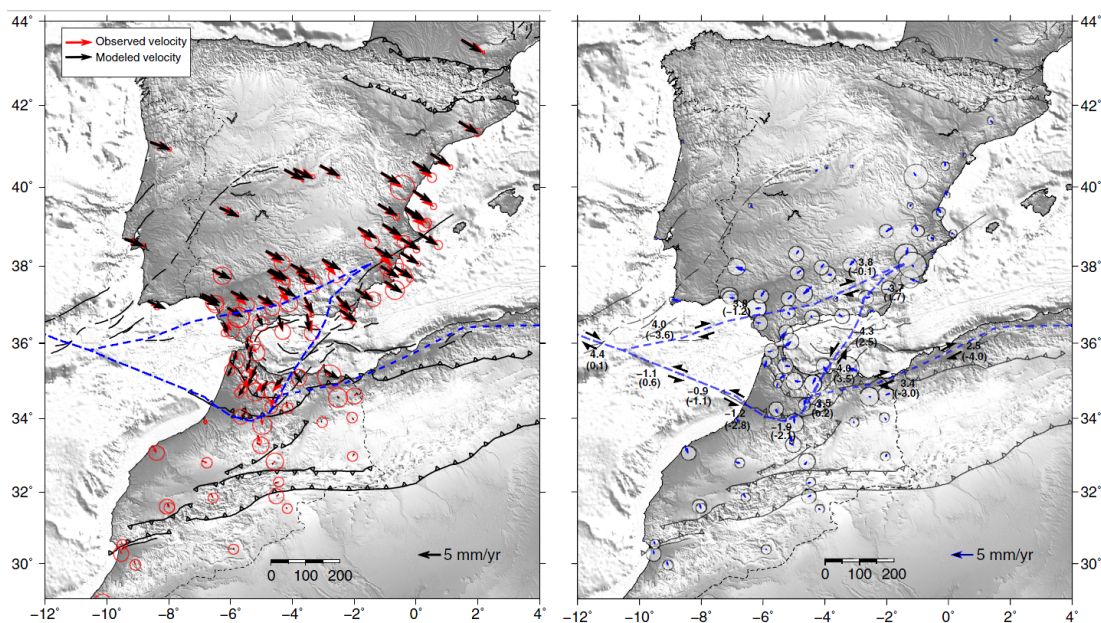


Figura 2.11: Campo de velocidades estimadas (izquierda) y magnitud del desplazamiento y bloques definidos (derecha) en la convergencia Iberia-Nubia. Fuente [Koulali et ál. \(2011\)](#)

En los últimos años, con el desarrollo de las nuevas redes permanentes GNSS, un número cada vez mayor de trabajos se centran en incorporar estos datos a sus estudios de deformación para densificar y mejorar así la interpretación de

## 2.- Antecedentes

sus resultados. Una de estas nuevas redes es la que se encuentra asociada al proyecto Topo-Iberia (de Lacy et ál., 2012; Gallastegui et ál., 2008; Gil et ál., 2012) con acceso en la web <http://www.igme.es/internet/TopoIberia/>. Este proyecto tiene como objetivo el entendimiento de las interacciones en la Península Ibérica dentro de un amplio rango de disciplinas, entre las que se pueden incluir la geología, geofísica y la geodesia. Para poder alcanzar las metas originales del proyecto se encuentran coordinados tres grupos de trabajo en los campos de la sísmica, la magneto-telúrica y la geodesia.

Las primeras decisiones del proyecto fueron el diseño de la nueva red de estaciones GNSS continuas, como complemento de otras redes que se encontraban ya operacionales bajo la supervisión de diferentes instituciones. En 2012 la red contaba con un total de 22 estaciones instaladas en diferentes regiones de España, más 4 localizadas estratégicamente en lugares de Marruecos. Este proyecto es la base para estudios de deformación en la zona de la Cordillera Bética obteniendo ya los primeros resultados.

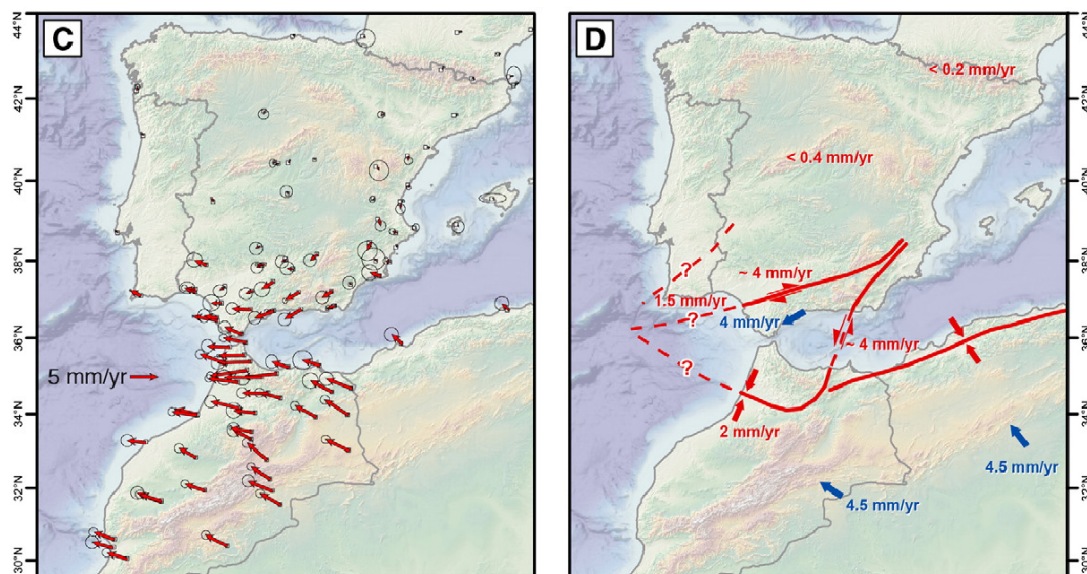


Figura 2.12: Campo de velocidades residuales y bloques en la convergencia Iberia-Nubia. Los valores están respecto a la parte estable de la placa Euroasiática y las elipses de error se muestran al 67% de confianza. Fuente Nocquet (2012)

En el último año, y en un esfuerzo de combinación de los resultados GPS publicados hasta la fecha en el área mediterránea, Nocquet (2012) plantea un trabajo recopilatorio donde se expone un campo de velocidades y esfuerzos a una escala continental. El trabajo tiene una gran importancia ya que engloba la totalidad del Mar Mediterráneo, las zonas Alpinas anexas e islas interiores, cubriendo hasta la parte más oriental con Turquía y Grecia. Su objetivo principal es discutir el comportamiento y deformación existente a partir de estudios previos,

para explicar así las condiciones de convergencia general de las placas Euroasiática y Nubia. Con ello añade además una comprobación de los modelos existentes, y trata de resolver los problemas cinemáticos que existen en la actualidad.

El estudio se centra en homogeneizar todos los resultados existentes que se han ido produciendo a lo largo de 30 años de observación GPS en todo el arco Mediterráneo, para obtener de este modo un modelo de deformación a gran escala. El trabajo incluye un total de 1495 vértices, con 1276 en la zona del Mediterráneo desde el Mar de Alborán hasta el Cáucaso, con una precisión aproximada de  $\pm 1$  mm/año. El campo de velocidades resultante es comparado con el modelo teórico ITRF2008 a la hora de sacar conclusiones e interpretar la geodinámica.

Uno de los aspectos más importantes de este trabajo es la propia combinación de los resultados existentes, ya que en muchos casos llegan a diverger considerablemente sus conclusiones, lo que dificulta la interpretación de los resultados. En la figura 2.12 se muestra la representación del campo de velocidades y la estimación de bloques para la zona más occidental del contacto, englobando tanto el sector más oriental de la Cordillera Bética como el Archipiélago Balear.

Entre sus conclusiones el trabajo confirma la pertenencia a la parte estable de la placa Euroasiática de la zona de Iberia situada al norte de la Cordillera Bética, con una velocidad residual de  $0,3 \pm 0,1$  mm/año, no presentando una deformación interior destacable. Respecto al Archipiélago Balear e islas del Mediterráneo occidental, no se detecta una deformación reseñable, lo que vendría relacionado directamente con la baja sismicidad de la zona.

En el sector meridional de la Península Ibérica, y coincidiendo con la zona suroeste de la Cordillera Bética, se aprecia un desplazamiento W-SW de aproximadamente 3 mm/año confirmado por trabajos anteriores. Para el Golfo de Cádiz se presenta un cambio en la dirección de las velocidades, incrementándose las magnitudes residuales hacia el Rif con una rotación en sentido horario. En el área del Rif, por su parte, se detecta un desplazamiento de 4 mm/año que se reduce hacia el sur al aplicarle el modelo de velocidades ITRF2008 (Figura 2.12). El trabajo también pone de manifiesto la indeterminación del borde de placas en las zonas oceánicas anexas, tanto al oeste para la dorsal Atlántica como al este para el Archipiélago Balear.

En los últimos meses, los trabajos que se han ido publicando en este campo inciden aún más en el uso de las capacidades que ofrecen las estaciones permanentes GNSS, con sus posibilidades a la hora de calcular una velocidad fiable y precisa. Esto ha abierto la posibilidad del tratamiento de series temporales de posiciones, que en muchos casos incluyen intervalos de observación superiores a los 5 años. En concreto, en el trabajo desarrollado por [Palano et ál. \(2013a\)](#) se analizan un total de 34 estaciones continuas GPS, junto a vértices para campañas episódicas, cuyos datos fueron recogidos entre los años 1999 y 2011. Entre las redes permanentes

## 2.- Antecedentes

elegidas se encuentran la red RAP de Andalucía, la europea EPN-EUREF, la valenciana ERVA y la murciana REGAM. Las observaciones fueron procesadas con el software GAMIT/GLOBK en relativo y se generaron series temporales en aquellas estaciones con datos continuos. El campo de velocidades resultado se muestra en la figura 2.13.

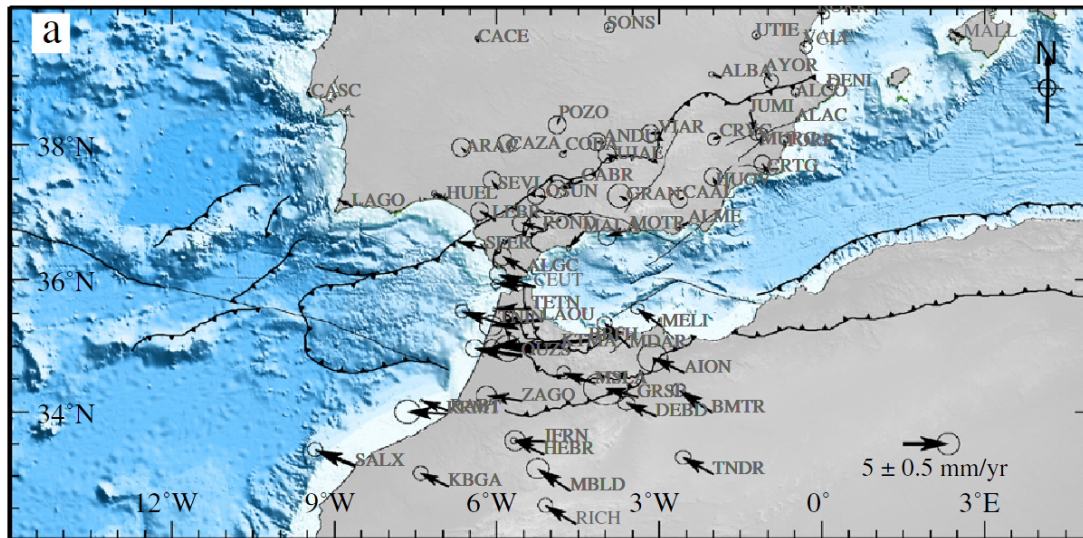


Figura 2.13: Campo de velocidades en la convergencia Iberia-Nubia fijando la velocidad de la placa Euroasiática al 95 % de confianza. Fuente [Palano et al. \(2013a\)](#)

En concreto este trabajo plantea una discusión a través de los trabajos geológicos, sísmicos y geofísicos disponibles para verificar la coherencia de sus resultados. Por un lado confirma la relación de la magnitud de los esfuerzos con el campo de energía potencial gravitacional, que sería el responsable de las discrepancias angulares observadas en grandes zonas de la Cordillera Bética. Además plantea un proceso de dinámica cortical profundo que controlaría tanto el campo de esfuerzos como la deformación superficial presente en el Arco Orogénico de Gibraltar.

Los resultados evidencian la naturaleza oblicua de la convergencia, lo que incide directamente en el comportamiento de deformación observado en las zonas anexas. El trabajo pone de relieve esfuerzos sobre el Arco Orogénico de Gibraltar, el área más meridional de la Cordillera Bética y la zona de cizalla en el sector más oriental de la misma (Figura 2.14). Se resalta además que la región de Al-Hoceima subduce en sentido antihorario con un valor angular de  $-1,7 \cdot 10^{-6}$  °/año, mientras que el margen sureste de las Béticas lo hace en sentido horario con magnitudes de  $-1,0 \cdot 10^{-6}$  °/año. Otra conclusión importante que se deriva del estudio es que las estaciones situadas en las zonas más externas del arco muestran una velocidad GPS con una orientación uniforme ENE-WSW, mientras que aquellas que están en el interior del arco orogénico evidencian un desplazamiento hacia el oeste.

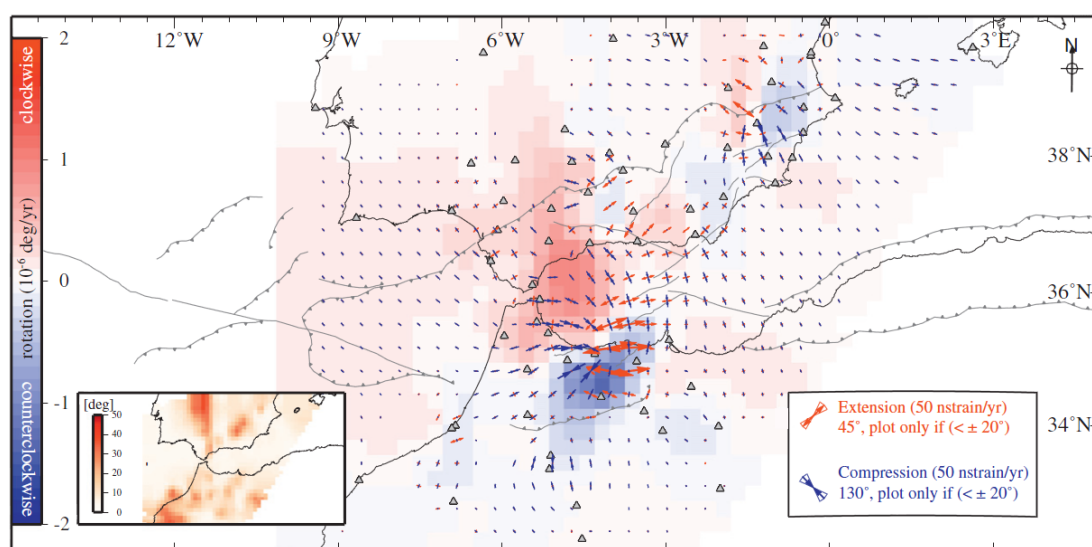


Figura 2.14: Mapa de esfuerzos de la convergencia Iberia-Nubia. Los colores rojos muestran predominancia de extensión y los azules de compresión. Fuente [Palano et ál. \(2013a\)](#)

Recientemente algunos trabajos en el área se han asociado a estudios geodésicos para explicar la posible finalización del proceso de subducción que dio lugar a la Cordillera Bética ([Mancilla et ál., 2013](#)). En este caso se investigan las relaciones entre la estructura subcortical y la deformación superficial en la región, para ello se utilizaron los tensores de los diferentes seísmos asociados a las fallas activas de la zona, junto a los campos de velocidad calculados a partir de las observaciones GPS.

En el apartado de datos espaciales, el trabajo hace uso de las observaciones GPS continuas durante 4 años de las 21 estaciones pertenecientes a la red RAP, situada en la Comunidad Andaluza, así como las estaciones cercanas pertenecientes a la red EPN-EUREF. Los resultados revelan la existencia de un desplazamiento diferencial de las estaciones más al sur de la red RAP, con movimientos de entre 0,5 – 3,3 mm/año respecto a las estaciones más al norte consideradas en la parte más estable de la placa. Esto concuerda además con la presencia de una mayor sismicidad en la zona por la convergencia WNW-ESE en el área de convergencia.

El campo de velocidades GPS indica la predominancia de extensión en dirección ENE-WSW en la parte central de la Cordillera Bética, lo que estaría de acuerdo con la presencia de fallas normales estimadas por datos sísmicos (Figura 2.15). Esta extensión no puede ser entendida en términos de convergencia de placas, lo que hace pensar en la existencia de una geodinámica cortical particular.

Las conclusiones, en este caso, se basan en considerar que la subducción del antiguo bloque de Tethys, asociado al dominio de Alborán, no estaría activa en la actualidad, presentándose una laminación y hundimiento a poca profundidad

## 2.- Antecedentes

del bloque. Estos datos concuerdan con los reflejados en trabajos al otro lado del Estrecho de Gibraltar donde la laminación sería similar, y está de acuerdo con la presencia de zonas con velocidades GPS anómalas.

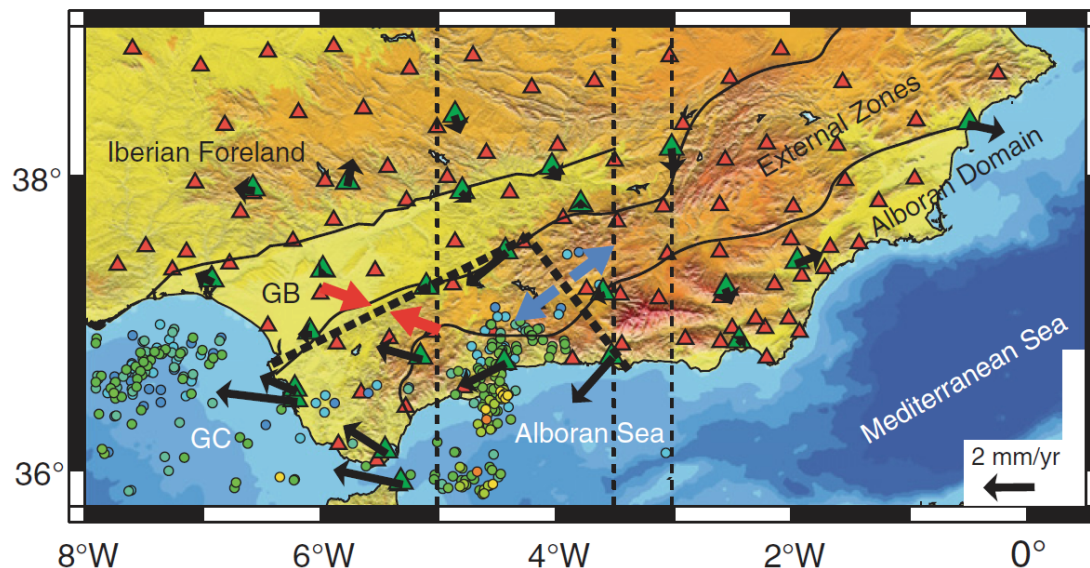


Figura 2.15: Campo de velocidades de la convergencia Iberia-Nubia. Se muestran los vectores de las estaciones GPS procesadas (triángulos verdes), las estaciones sísmicas (triángulos rojos) así como la estimación de límite de placas según los datos. GB: Cuenca del Guadalquivir, GC: Golfo de Cádiz. Fuente [Mancilla et ál. \(2013\)](#)

Uno de los trabajos más recientes, y que se centra explícitamente en el sector oriental de la Cordillera Bética, es el realizado por [Echeverría et ál. \(2013\)](#). En él se presenta un modelo de deformación cortical derivado de observaciones GPS sobre 28 estaciones permanentes y 15 vértices pertenecientes a la red CuaTeNeo. Esta red fue construida en 1996 ([Colomina et ál., 1999](#); [Garate et ál., 2003](#)) con el objetivo de cuantificar la deformación cortical en la parte más oriental de las Béticas. El proyecto, iniciado por la Universidad de Barcelona y el Institut Cartogràfic de Catalunya, cuenta en la actualidad con la participación del Real Observatorio de la Armada de San Fernando.

Las observaciones de las campañas episódicas se extendieron durante 15 años y 5 campañas, 1997, 2002, 2006 y 2011, siendo calculadas con el software GAMIT-GLOBK en procesado relativo. Posteriormente el trabajo genera las series temporales en las estaciones permanentes, calculando una estimación de valores de velocidad con el análisis y filtrado de estas series. Una de las características más importantes de este estudio es la inclusión de la red CuaTeNeo en el proceso de cálculo, ya que densifica los valores de velocidad en el sector oriental de la Cordillera Bética, definiendo un modelo de esfuerzos más homogéneo.

Sus resultados evidencian una clara actividad tectónica en la zona, con velocidades relativas en dirección noroeste en la mayoría de las estaciones. Los rangos

varían entre 2,0 mm/año cerca de la costa y 0,5 – 0,7 mm/año en el interior. Las velocidades GPS y los esfuerzos calculados sugieren una compresión en dirección NW-SE con una extensión local SW-NE en la parte más suroccidental de la red (Figura 2.16).

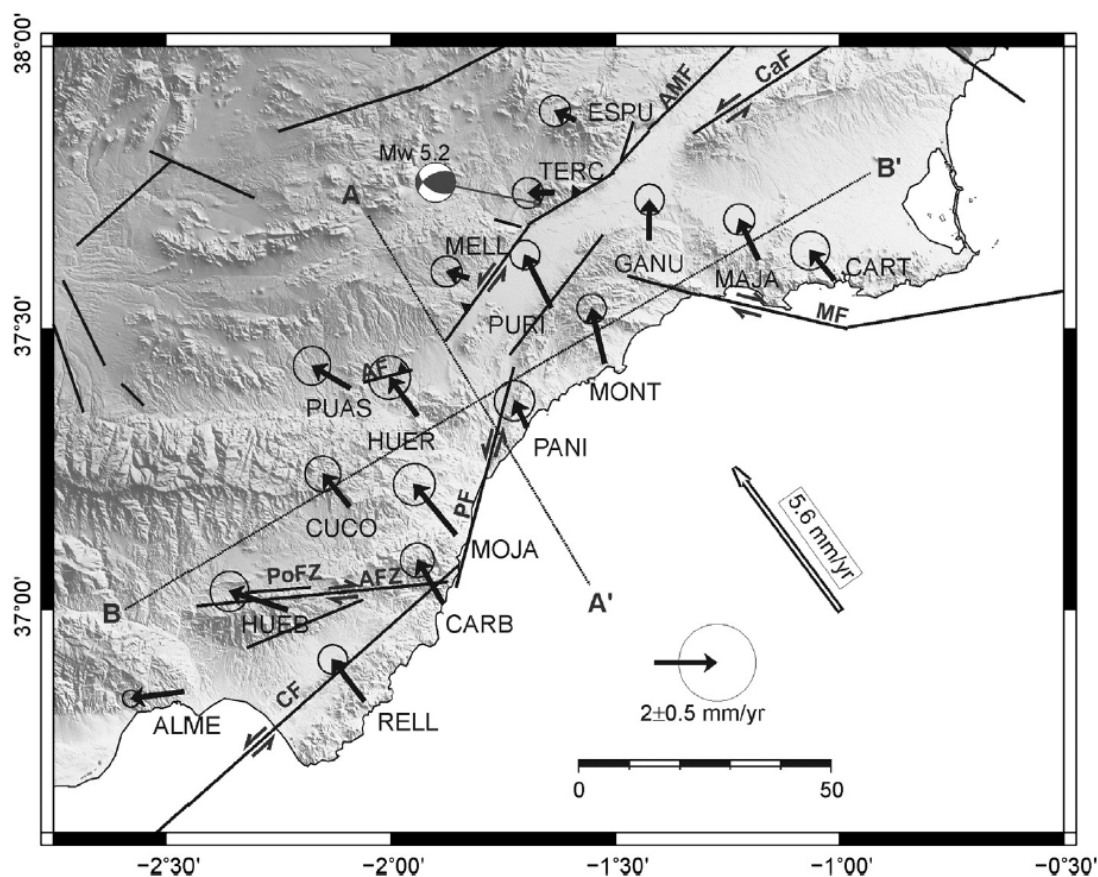


Figura 2.16: Campo de velocidades estimado a partir de los vértices GPS de la red CuaTeNeo. Elipses al 95 % de confianza. Fuente [Echeverría et ál. \(2013\)](#)

Sus conclusiones no difieren en gran medida de los trabajos anteriores, ya que señala a la convergencia actual Iberia-Nubia como responsable de este proceso de deformación. Su novedad radica en la inclusión de un campo de esfuerzos en el sector oriental de la Cordillera Bética, relacionado con las fallas activas más importantes del área, responsables entre otros del terremoto de Lorca de mayo de 2011. Los niveles de deformación predominantes son de extensión en la zona de Almería y de compresión en el sur de la Comunidad Murciana, falla de Alhama de Murcia y Palomares. El índice de deformación calculado es de  $1,5 \pm 0,3$  mm/año, en concordancia con trabajos geológicos anteriores (Figura 2.17).

Para finalizar, uno de los trabajos recientes más interesantes al enlazar el sector oriental de la Cordillera Bética con el Archipiélago Balear, es el presentado por

Maillard y Mauffret (2013). Este estudio es novedoso porque trata la estructura y deformación reciente en el margen más oriental de la Península Ibérica. Su área de investigación se extiende más allá de la Cordillera Bética, incluyendo la cuenca de Valencia, Alicante y el Canal de Ibiza, en la zona más occidental del Archipiélago Balear.

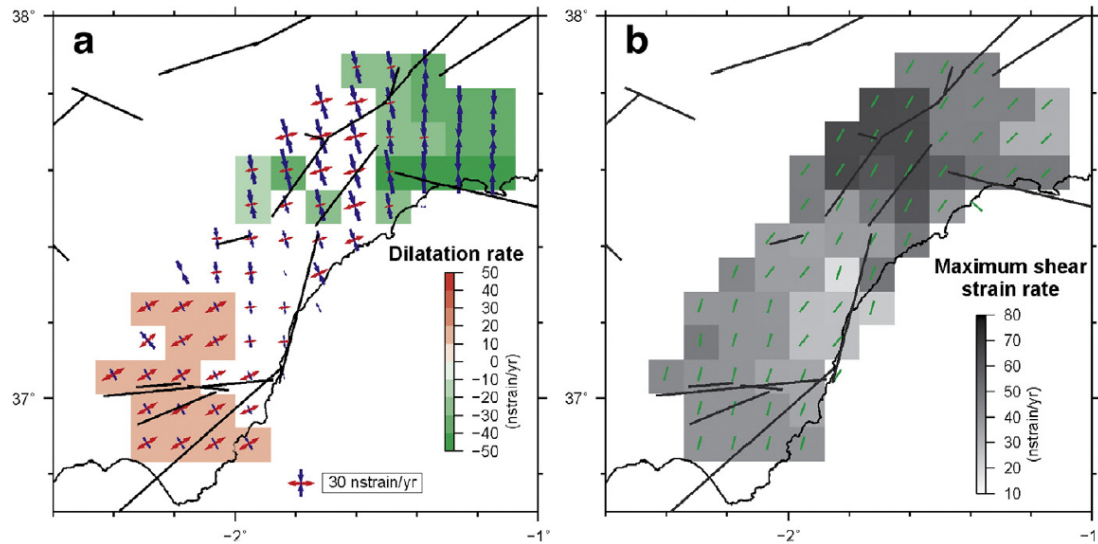


Figura 2.17: Mapa de esfuerzos estimado a partir de los vértices GPS de la red CuaTeNeo en base a una malla de 10 km. Por un lado se muestra la magnitud de dilatación (izquierda) y el valor máximo de esfuerzo (derecha). Los colores rojos muestran predominancia de extensión y los verdes de compresión. Fuente Echeverria et ál. (2013)

El trabajo se fundamenta principalmente en estudios de datos batimétricos y líneas sísmicas, aunque incluye además medidas GPS basadas en la deformación obtenida por Serpelloni et ál. (2007). Sus resultados destacan el predominio de la contracción en el margen occidental de la Península y la existencia de cierta extensión en la zona meridional de la cuenca de Valencia, datos consistentes con los campos de esfuerzos regionales obtenidos con técnicas sísmicas y GPS. Además admite la posibilidad de que la compresión desarrollada en la zona de convergencia en el norte de Argelia puede transmitirse al área occidental del Archipiélago Balear, enlazando con la costa de Alicante (Figura 2.4).

# 3

## Descripción geológica y tectónica

---

*“Considerando la carta del globo terráqueo, me golpeó súbitamente la concordancia de las costas del Atlántico”*

Alfred L. Wegener (1880-1930)

### 3.1. Localización geográfica

El área de estudio incluye el sector centro-oriental de la Cordillera Bética y el Archipiélago Balear y se extiende administrativamente por las provincias más orientales de la Comunidad Andaluza (Jaén, Granada y Almería), la comunidad Murciana, la provincia de Alicante y la Comunidad de las Islas Baleares. A pesar de su cercanía geográfica, morfológicamente ambas zonas poseen características muy diferentes (Figura 3.1); por un lado, en el sector oriental de la Cordillera Bética se desarrolla un relieve destacado que tiene como extremo el Pico Mulhacén en Sierra Nevada (3478 m). Además cuenta con otras áreas elevadas como la Sierra de los Filabres y otras pertenecientes a las Zonas Externas, todas ellas con alturas que superan los 1000 m. Entre las unidades topográficas principales se intercalan varias cuencas hidrográficas entre las que resaltan la del Genil, Guadiana Menor, Andarax y Almanzora en la zona meridional, la cuenca del Segura en el extremo oriental y la cuenca del Guadalquivir al norte de la Cordillera Bética.

Por su parte el Archipiélago Balear está constituido por una serie de Islas situadas en la prolongación hacia el este de la Cordillera Bética en el Mar Mediterráneo. Lo forman dos grupos de islas, por un lado las llamadas *Gimnesias*, con Mallorca, Menorca, Cabrera e islotes cercanos y las *Pitiusas*, con Ibiza y Formentera. Topográficamente los relieves más elevados no superan en ningún caso los

### 3.- Descripción geológica y tectónica

1500 metros, destacando el Puig Mayor de 1445 m en la Sierra de Tramuntana. La red hidrográfica, por su parte, es de poca entidad.

Las áreas de estudio se encuentran en la confluencia de dos placas tectónicas principales: La Euroasiática al norte y la placa Nubia al sur. La Cordillera Bética oriental se sitúa en el límite de placas difuso entre Eurasia y Nubia, con una velocidad de convergencia en la longitud de la provincia de Alicante y Baleares de alrededor de 5 mm/año (Nocquet, 2012). Según Serpelloni et ál. (2007), en el Tell argelino se acomodan entre 2,7 y 3,9 mm/año de la convergencia actual entre África (Nubia) y Eurasia, y el resto lo hace más al norte, principalmente en la Cordillera Bética y en la Cuenca Argelino-Balear y Alborán.

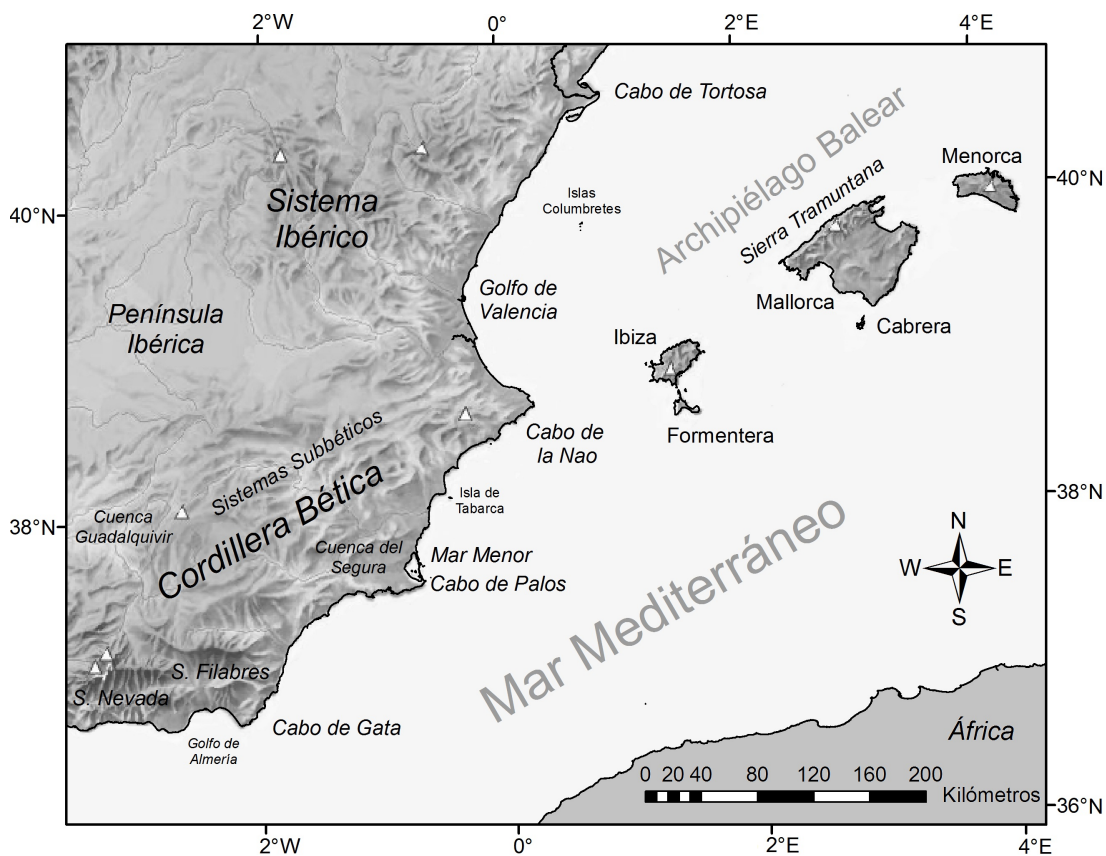


Figura 3.1: Mapa general de las zonas de estudio donde se incluye el sector oriental de la Cordillera Bética y el Archipiélago Balear

En los próximos apartados se incluye una descripción pormenorizada de cada uno de estos sectores, comentando los aspectos geológicos, tectónicos y sísmicos más sobresalientes, para conformar el contexto geológico regional de las zonas de estudio.

## 3.2. Cordillera Bética

### 3.2.1. Contexto geodinámico

La Cordillera Bética, junto al Rif marroquí, se sitúa en el área más occidental de las cadenas Alpinas Mediterráneas, formando el Arco Orogénico Bético-Rifeño. La Cordillera Bética está dividida en dos dominios principales: las Zonas Externas, en la parte más septentrional, y las Zonas Internas, situadas al sur. Además de estos dos dominios principales, también se diferencian el Complejo del Campo de Gibraltar y las cuencas Neógeno-Cuaternarias (Sanz de Galdeano, 1990; Vergés y Fernández, 2012).

Para explicar el desarrollo de las estructuras de la Cordillera Bética se han propuesto varios modelos geodinámicos que se pueden agrupar en dos conjuntos principales: Por un lado aquellos que implican el despegue o delaminación de litosfera subcontinental bajo la región de Alborán y, por otro, aquellos que proponen la subducción de litosfera oceánica asociada con un proceso de *roll-back* y/o despegue de la placa subducida (Pedrera et ál., 2011).

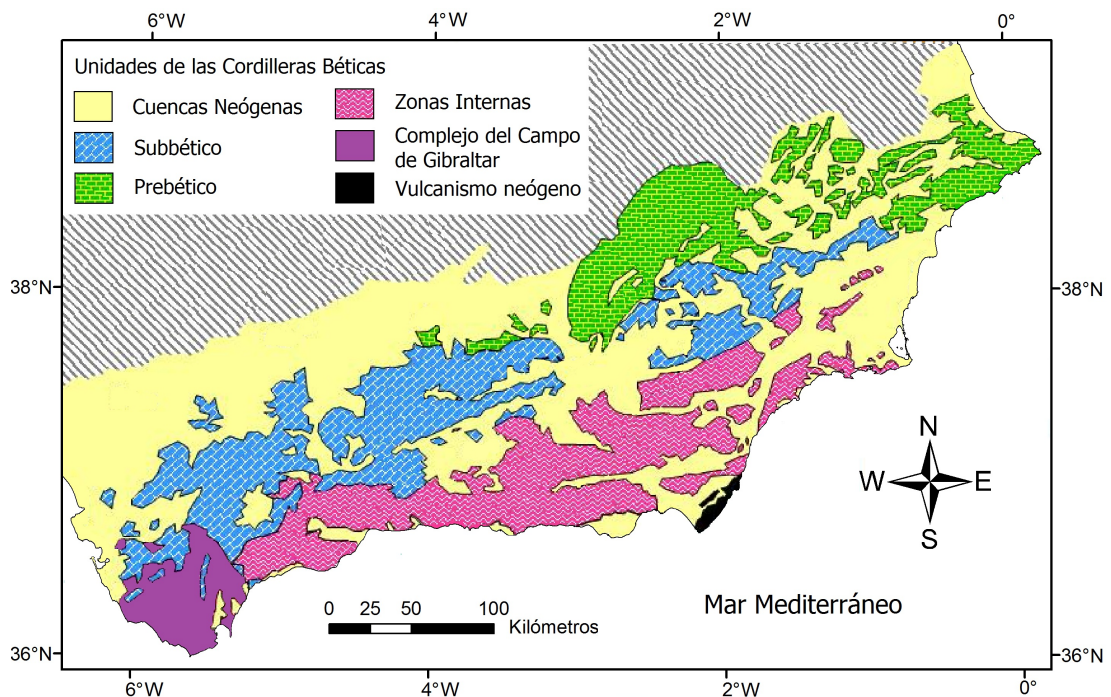


Figura 3.2: Mapa de las unidades de la Cordillera Bética

### 3.2.1.1. Zonas Externas

Este dominio es el más septentrional y oriental de la Cordillera Bética y se encuentra limitado al norte por el Macizo Varisco y la Cuenca del Guadalquivir, al oeste por el Complejo del Campo de Gibraltar y, al este, por el Mar Mediterráneo. Su estructura está constituida por un conjunto potente de rocas sedimentarias, en su mayoría marinas. Debido a la orogenia Alpina, los materiales que componen este dominio se encuentran deformados presentando pliegues y cabalgamientos vergentes hacia el norte, generalmente con dominio de la dirección ENE-OSO, y con un despegue generalizado de la cobertera a nivel del Triásico Medio-Superior.

De manera genérica se ha determinado la existencia de dos subdivisiones dentro de este dominio, la zona Prebética al norte y la Subbética al sur (Figura 3.2), ambas enlazadas con una serie de unidades intermedias con características estratigráficas mixtas (Vera et ál., 1984). El depósito de los materiales que componen estas unidades viene dado por los sedimentos provenientes del Macizo Varisco durante el Triásico y el Mioceno Inferior (250-20 Ma). Estos materiales acumulados en el margen meridional del macizo fueron elevados por la orogenia Alpina posterior. La diferencia entre las zonas Prebética y Subbética se basa en los criterios sedimentológicos y estratigráficos (Gelabert, 1998) que a continuación se detallan:

- **Zona Prebética:** Es el área más septentrional de las Zonas Externas y se extiende desde el límite sur de las provincias de Córdoba y Jaén hasta la provincia de Alicante. Esta zona muestra facies características de mares poco profundos (Sanz de Galdeano y Vera, 1991), con episodios detríticos frecuentes (areniscas y lutitas) e interrupciones sedimentarias debido a emersiones. Los materiales predominantes son calizas, margas y areniscas del Mesozoico y Terciario.
- **Zona Subbética:** Situada en el contacto con las Zonas Internas, este área se extiende desde la provincia de Cádiz hasta la provincia de Alicante. Su característica principal es que muestra facies pelágicas (Sanz de Galdeano y Vera, 1991). La litología predominante en este caso son rocas sedimentarias de tipo margas, margo-calizas y calizas de tipo dolomítico, con presencia elevada de fósiles, intercalados con algunas coladas básicas generadas por erupciones submarinas.

Tanto el Prebético como el Subbético sufrieron esfuerzos compresivos de dirección NO-SE que dieron lugar a pliegues y cabalgamientos, con una dirección principal ENE-OSO. Las Zonas Externas están caracterizadas por una tectónica de cobertera (Figura 3.3). Este desplazamiento se vio beneficiado por la presencia subyacente de estratos de margas yesosas del trias, que sirvió de lubricante para los estratos superiores.

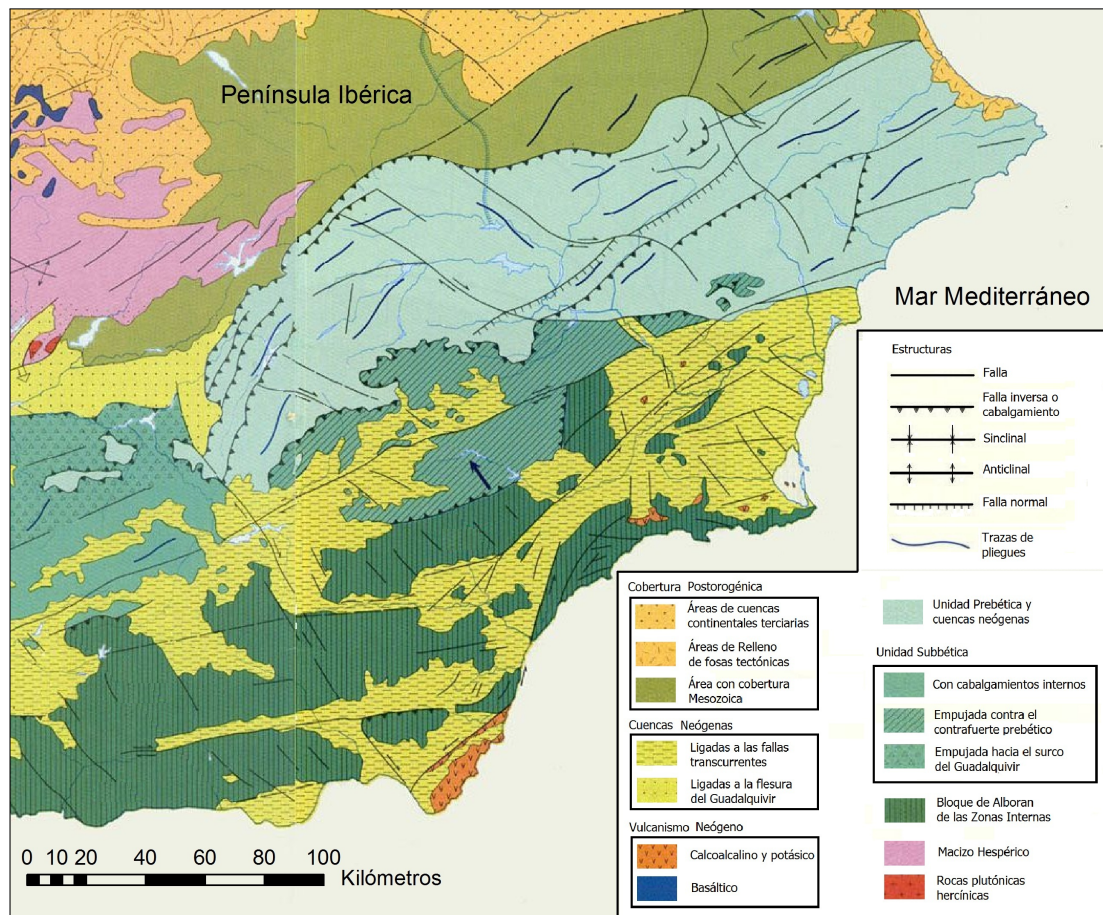


Figura 3.3: Mapa geológico de la zona sureste de la Cordillera Bética. Fuente Atlas Geológico Nacional de España (IGN-CNIG)

### 3.2.1.2. Zonas Internas

Las Zonas Internas, constituidas por un conjunto de mantos alóctonos, se encuentran bordeados por las Zonas Externas al norte, el Complejo del Campo de Gibraltar al norte y noroeste y por el Mediterráneo y el Mar de Alborán al sur (Sanz de Galdeano, 1990). Sus unidades principales son:

- **Complejo Nevado-Filábride:** Con presencia principal en Sierra Nevada y Sierra de los Filabres, está constituido por las rocas más antiguas de las Zonas Internas y datan del Paleozoico (edades superiores a los 250 Ma). Los materiales de este complejo proceden de rocas de origen marino que fueron sometidas a procesos de metamorfismo alpino (Sanz de Galdeano y Vera, 1991).
- **Complejo Alpujárride:** Es el complejo de mayor extensión de las Zonas Internas y aflora extensamente en Las Alpujarras al sur de Sierra Nevada.

Presenta un metamorfismo de nivel moderado a intenso. Litológicamente está constituido por un zócalo de esquistos negros con cobertera de filitas del Triásico Inferior (250 Ma) en la que descansa una formación carbonatada de calizas, dolomías y mármoles del Triásico medio y superior con origen en medio marino somero. En la parte más oriental, coincidiendo con la Serranía de Ronda, aparecen rocas ultrabásicas (peridotitas).

- **Complejo Maláguide:** Situado principalmente al oeste de las Zonas Internas en la provincia de Málaga, está compuesto por dos conjuntos litológicos superpuestos: Un zócalo paleozoico y una cobertera mesozoica y terciaria que apenas presenta metamorfismo (Mérida, 1997).

#### 3.2.1.3. Complejo del Campo de Gibraltar

Situado en el extremo más occidental de la Cordillera Bética en el Arco Orogénico de Gibraltar, este complejo aflora en la parte más meridional de la provincia de Cádiz, al otro lado del Estrecho en la costa marroquí, y de manera discontinua en las áreas de contacto entre las Zonas Externas e Internas (Figura 3.2). Constituido por unidades alóctonas procedentes de la Cuenca de los *Flyschs* (Soria et ál., 1993), presentan sedimentos mesozoicos, y sobre todo turbiditas, de edad Terciaria. Sus unidades cabalgan la cobertera del dominio de las Zonas Externas y cuencas neógenas y a su vez están cabalgadas por las Zonas Internas de la Cordillera Bética situadas más al este (Gutscher et ál., 2012).

#### 3.2.1.4. Cuencas Neógeno-Cuaternarias

Entre los relieves principales que constituyen la Cordillera Bética se han desarrollado numerosas cuencas internas durante el Neógeno y el Cuaternario. Según el origen de las mismas estas cuencas se dividen en sinorogénicas (formadas durante el Mioceno Inferior y Medio) y postorogénicas (formadas a partir del Mioceno Superior). Entre las cuencas más importantes destacan la de Guadix-Baza y la de Granada, existiendo datos para afirmar que había intercomunicación entre ellas y que su proceso de sedimentación, originalmente marino, pasó a ser lacustre y fluvial en época reciente (Vera et ál., 1984).

Mención aparte tiene la Cuenca de antepaís del Guadalquivir, la de mayor extensión, que durante el Mioceno Inferior y Medio permitía la conexión entre el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo. A partir del Mioceno Superior se perdió esta conexión, elevándose esta zona progresivamente de este a oeste. En su parte más occidental se encuentran los sedimentos más modernos, de edad Plioceno y Cuaternario.

En la zona más oriental de la Cordillera Bética se encuentra además la cuenca del Bajo Segura cuyo basamento está constituido por materiales de las Zonas Externas al norte e Internas al sur. Esta cuenca está formada por materiales de relleno que abarcan desde el Mioceno Superior hasta el Cuaternario existiendo gran variedad de facies marinas y continentales (Alfaro, 1995).

### 3.2.1.5. Vulcanismo neógeno

En la zona sudeste de la Cordillera Bética se encuentra un extenso afloramiento de rocas volcánicas que se localiza en el área del Cabo de Gata (provincia de Almería). Los materiales que aparecen en la zona se clasifican en riolitas, riocacitas, dacitas y andesitas atribuyéndose a erupciones volcánicas que tuvieron lugar durante el Neógeno (Vera et ál., 1984).

### 3.2.2. Tectónica Activa

La zona sureste de la Península Ibérica se encuentra condicionada a nivel tectónico por la presencia de dos estructuras características que reciben la denominación de *Trans-Alboran Shear Zone* TASZ y *Eastern Betic Shear Zone* EBSZ, tal como se puede observar en la figura 3.4.

La TASZ es una de las estructuras activas principales del Arco de Gibraltar (de Larouzière et ál., 1988; Frizon de Lamotte et ál., 1980) considerándose como un sistema más complejo que forma parte de una delgada microplaca que hace de fronteras entre las placas de Eurasia y Nubia (Gil de la Iglesia, 2008). Por su parte, la EBSZ consiste en la continuación de la TASZ en dirección NE-SW (de Larouzière et ál., 1988; Silva et ál., 1993), donde estudios sísmicos actuales muestran que está sometida a un efecto de levantamiento regional (Faulkner et ál., 2003; García-Mayordomo y Martínez-Díaz, 2006; Orozco, 2006).

Asociadas a la EBSZ se encuentran una serie de fallas en un intervalo aproximado de unos 250 kilómetros desde la provincia de Alicante hasta Almería. Entre ellas se pueden destacar las fallas del Bajo Segura, Carrascoy, Alhama de Murcia, Albox, Palomares y Carboneras (Figura 3.5). Estas fallas corresponden con el ajuste del acortamiento cuaternario y neógeno descrito en Sanz de Galdeano (1990) y son esencialmente fallas inversas y de desgarre (de Larouzière et ál., 1988).

La falla del Bajo Segura es una falla inversa ciega con una longitud aproximada de unos 30 kilómetros y orientación ENE-WSW al sur de Alicante y SW-NE en Murcia. Se extiende desde Zeneta hasta Guardamar del Segura por los municipios de Murcia, Orihuela, Almoradí y Torre Vieja, prolongándose hacia el Este en el

### 3.- Contexto geodinámico

Mar Mediterráneo. Tiene un desplazamiento estimado de entre 0,2 y 0,4 mm/año (Alfaro et ál., 2012). La falla inversa de Carrascoy es la continuación hacia el oeste de la falla del Bajo Segura (Silva et ál., 1993), tiene una longitud de unos 30 kilómetros y una tasa de desplazamiento horizontal estimado de 0,5 mm/año (García-Mayordomo, 2005).

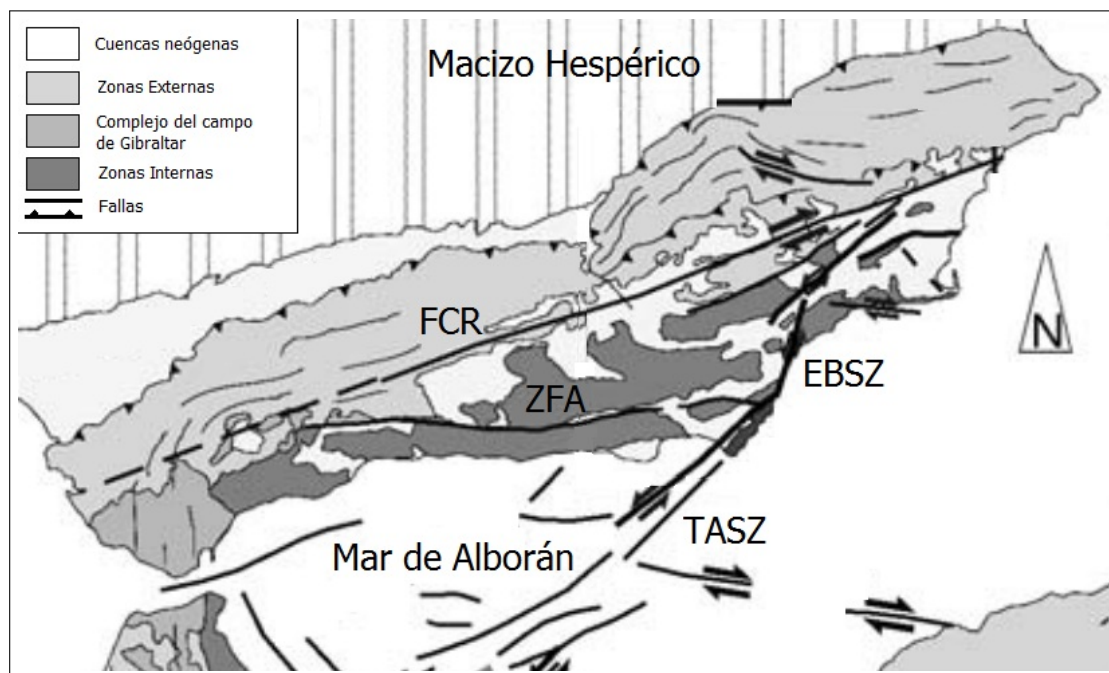


Figura 3.4: Tectónica General de la Cordillera Bética. ZFA: Zona de Falla de las Alpujarras, FCR: Falla de Crevillente, TASZ: Trans-Alboran Shear Zone y EBSZ: Eastern Betic Shear Zone. Fuente Martínez-Díaz y Hernández-Enrile (2004)

Una de las estructuras más activas en el sector oriental de la Cordillera Bética y relacionada con la EBSZ es la falla de Alhama de Murcia. Esta falla tiene una dirección aproximada SW-NE y se extiende desde el límite norte de la depresión de Huércal-Overa hasta las proximidades de Murcia capital, atravesando el centro de la región por Puerto Lumbreras, Lorca, Totana y Alhama de Murcia. Considerada como una de las más activas del área, es responsable entre otros del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 (Echeverría et ál., 2013). Los resultados de paleosismología indican que esta falla tiene un desplazamiento horizontal de aproximadamente 0,5 mm/año (Martínez-Díaz et ál., 2012; Ortuño et ál., 2012).

En la zona almeriense se encuentra la falla inversa de Albox, localizada al sur de la de Alhama de Murcia y con una dirección WSW-ENE. La mayoría del acortamiento producido en los últimos años ha sido ajustado por esta falla (Masana et ál., 2005). Una de las más meridionales es la falla de Palomares, que con una longitud de 25 kilómetros se extiende en una dirección NNE-SSW

ajustando su orientación en la parte norte para ser paralela a la terminación sur de la falla de Alhama de Murcia (García-Mayordomo, 2005). Esta falla marca la linealidad de varias sierras como son la de los Filabres y Sierra de las Estancias en la provincia de Almería (Gil de la Iglesia, 2008)

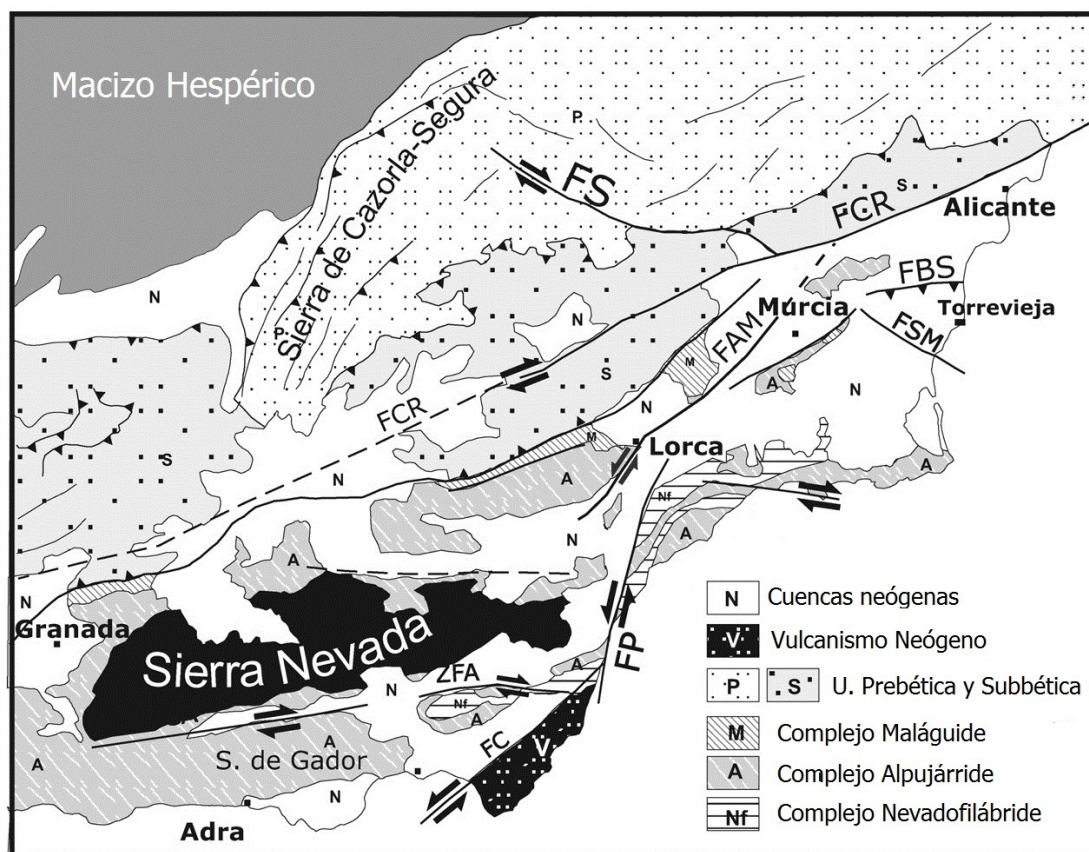


Figura 3.5: Mapa Tectónico de la zona sureste de la Cordillera Bética. FC: Falla de Carboneras, ZFA: Zona de Falla de las Alpujarras, FP: Falla de Palomares, FSM: Falla de San Miguel, FBS: Falla de Bajo-Segura, FAM: Falla de Alhama de Murcia, FS: Falla de Socorros, FCR: Falla de Crevillente. Fuente Pérez-López et ál. (2009)

La falla de Carboneras es la situada más al sur dentro del complejo EBSZ. Esta estructura se extiende aproximadamente unos 50 kilómetros sobre tierra para adentrarse hasta 100 kilómetros en el Mar de Alborán (Gràcia et ál., 2006). Con una expresión morfológica clara, esta falla cuenta con una actividad relativamente reciente, y estudios paleosísmicos indican que posee desplazamientos de 1,3 mm/año en la zona NE (Moreno, 2011).

Fuera de la zona de la EBSZ existen otras estructuras que tienen importancia como son la falla de Moreras y la zona de fallas de las Alpujarras (Echeverría et ál., 2013), esta última con una longitud elevada en dirección E-W (Figura 3.4). Todas estas fallas han sido estudiadas por numerosos trabajos entre los que se destacan Rodríguez-Estrella et ál. (2011); Sanz de Galdeano (1996, 2008).

Las estructuras anteriormente descritas tienen una actividad reciente desde el Mioceno Superior-Plioceno, siendo más activas en este período y en el Cuaternario (Gil de la Iglesia, 2008). El corredor de cizalla de la Bética Oriental (EBSZ) está por tanto caracterizado por un conjunto de fallas activas de desgarre sinistrorso e inversas en el sector nordeste, que son responsables de gran parte de la sismicidad del sector más oriental de la Cordillera Bética (Gràcia et ál., 2006).

El sector más occidental de la zona de estudio peninsular, constituido por las cuencas de Guadix-Baza y Granada, está caracterizado por una compresión NNW-SSE y una tensión aproximadamente perpendicular. La compresión ha formado pliegues de dirección N70°E a EW de magnitud variable, siendo el antiforme de Sierra Nevada el de mayor tamaño. La tensión se acomoda principalmente debido a fallas normales con dirección NW-SE, entre las que destacan las fallas de Baza, en la cuenca de Guadix-Baza, y las de Granada, Sierra Elvira y Padul-Dúrcal, en la cuenca de Granada. Las tasas de desplazamiento de estas estructuras activas, calculadas a partir de marcadores geológicos, varían entre 0,06 y 0,5 mm/año.

#### 3.2.3. Sismicidad

La zona de la Cordillera Bética, y más concretamente los sectores más orientales, se encuentran entre los de mayor sismicidad dentro de la Península Ibérica (Bufohn et ál., 1997). Existen registros documentados de seismos en la región en época histórica caracterizándose generalmente por terremotos de tipo superficial, de magnitud pequeña o moderada y que no suelen exceder magnitud 5. Entre los terremotos recientes ocurridos en este sector oriental de la Cordillera Bética destacan los de Ojos (1908), Adra (1910), Lorquí (1911), Cotillas (1911), Jacarilla (1919), Cehegín (1948), Mula (1999), Bullas (2002), Zarcilla de Ramos-La Paca (2005) y Lorca (2011) (Martínez-Díaz et ál., 2012).

Según el catálogo de terremotos del Instituto Geográfico Nacional, representados en la figura 3.6, la mayor parte de la actividad sísmica se concentran en el corredor de cizalla de la Bética Oriental (EBSZ) y en su prolongación en el mar de Alborán a lo largo de la TASZ. Asimismo también se observa actividad sísmica en sectores más septentrionales de las Zonas Externas.

Debido a esta actividad sísmica se han podido calcular los mecanismos focales de algunos de los terremotos registrados. Rodríguez-Pascua y de Vicente (2001) plantearon un estudio sobre 28 seismos ocurridos hasta 1997 y con magnitud superior a 3 para el cálculo de estos mecanismos. Sus resultados constatan la existencia de dos campos de esfuerzo, por un lado el definido por fallas inversas marcando una dirección prácticamente N-S (N158E) y profundidades de entre 4 y 22 kilómetros y otro de predominio de fallas normales sobre inversas con una

dirección SW-NE (N062E), con seismos más superficiales de entre 2 y 15 kilómetros. Estos resultados se ajustan a la hipótesis de una flexura cortical antiformal de dirección E-W, con una elevación generalizada de la zona, fallas normales por encima de la superficie neutra y fallas inversas en profundidad (Rodríguez-Pascua y de Vicente, 2001).

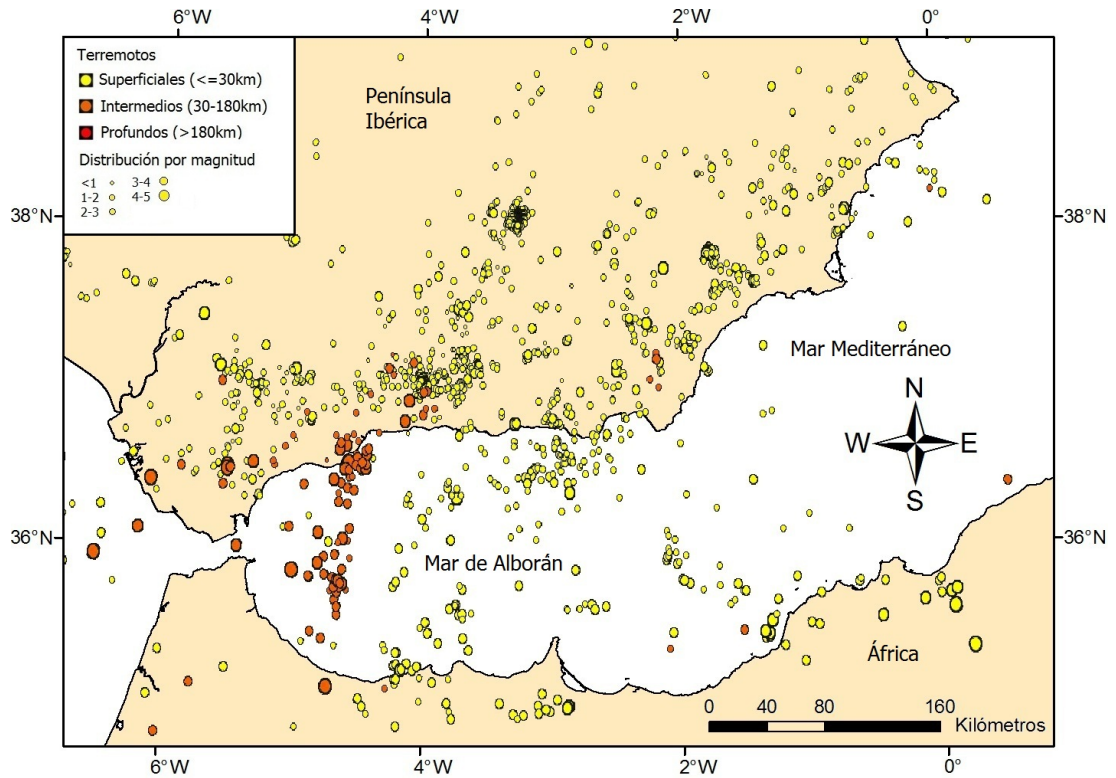


Figura 3.6: Representación de la actividad sísmica en la Cordillera Bética. Terremotos registrados en el año 2013 obtenidos a partir del catálogo del IGN según magnitud y profundidad

## 3.3. Archipiélago Balear

### 3.3.1. Descripción y litología

Las rocas más antiguas que afloran en las Islas Baleares datan de los períodos Devónico y Silúrico, abarcando un registro casi continuo desde los últimos 400 Ma. Las rocas de la Era Secundaria o Mesozoico (250-65 Ma) son las más abundantes en el archipiélago, abarcando parte de las Sierras de las Islas de Mallorca e Ibiza. Por su parte, son especialmente significativos los sedimentos terciarios con una edad inferior a los 65 Ma y que se presentan en Formentera, sur de Menorca y Mallorca. A continuación se describen las distintas características geológicas del archipiélago de manera más detallada.

#### 3.3.1.1. Promontorio Balear

Las Islas Baleares están caracterizadas por encontrarse sobre el denominado *Promontorio Balear*, considerado por muchos autores como una prolongación sumergida de la Cordillera Bética hacia el nordeste. Este promontorio se encuentra limitado al norte de Menorca por la falla direccional dextra asociada al giro antihorario de las islas Córcega y Cerdeña en la transición del Oligoceno al Mioceno (30-23 Ma) (Gelabert, 1998). El borde sur está definido por grandes fallas normales entre las que cabe destacar la falla o escarpe de Emile Baudot (Figura 3.9), estructura de 300 km. de largo situada a SE de Mallorca.

La sobre elevación sobre el fondo del Mar Mediterráneo lo constituyen los conjuntos separados de las Islas Pitiusas y las islas más orientales de Mallorca y Menorca, con plataforma continental independiente. Entre éstas existen collados submarinos que las separan con 800 metros de profundidad entre el Cabo de la Nao e Ibiza y entre las Pitiusas y Mallorca (Canal de Mallorca) (Riba, 1983). Estas plataformas separan a su vez las cuencas de Valencia y de la Provenza con la Argelina, con profundidades que oscilan entre los 2000 y 3000 metros, situadas al norte y sur del archipiélago.

Los estudios llevados a cabo en el área indican que la cuenca situada al noroeste del promontorio posee una corteza continental adelgazada con un espesor inferior a los 15 kilómetros (Gelabert, 1998), lo que contrasta con el espesor en la zona del promontorio que oscila entre los 20 y 25. Existen evidencias de que el Promontorio Balear ha estado sometido a compresión durante la orogenia Alpina, que generó a su vez pliegues y cabalgamientos responsables de la estructuración de cordilleras y cuencas compresivas. Además se detecta extensión en las regiones que rodean al Promontorio Balear asociadas a cuencas retro-arco. Esta extensión se manifiesta a partir del Mioceno Superior y las fallas normales afectan a las estructuras compresivas más antiguas (Roca, 1992).

### 3.3.1.2. Isla de Menorca

La isla más oriental del archipiélago se puede dividir en dos regiones con características geológicas muy diferentes. Por un lado se presenta la mitad septentrional (*Tramuntana*), con topografía más destacada y compuesta de materiales paleozoicos y mesozoicos y, por otro, la situada al sur (*Migjorn*) con materiales del Mioceno más modernos (Figura 3.8) y donde el relieve ondulado ha generado una incipiente red de barrancos y torrentes.

La región de Tramuntana posee los materiales más antiguos del Archipiélago Balear con series del Devónico (400 Ma) acompañados de extensiones carboníferas (350-300 Ma) con unidades preferentemente turbidíticas (Durán et ál., 2006). A continuación, en discordancia angular con los anteriores, se encuentran materiales Pérmicos de transición a la serie Mesozoica posterior. Respecto al Mesozoico cabe destacar el afloramiento representativo en el Monte Toro (358 m.), la mayor elevación de la isla perteneciente al Triásico, y los materiales dolomíticos del Jurásico en la zona más oriental de Tramuntana. Los depósitos datados en el Cretácico Inferior, de naturaleza calcárea y margosa, se localizan en el extremo nororiental de la isla, a los que se suman los de la serie paleógena posterior de transición con conglomerados y arcillas.

La región del Migjorn, por su parte, tiene una distribución más homogénea (Figura 3.8) y posee únicamente depósitos pertenecientes a la fase postorogénica del Mioceno. En la misma se pueden diferenciar varias unidades temporales basadas en materiales de conglomerado y formaciones calcareníticas, siendo los depósitos más recientes de plataforma arrecifal. Según Gelabert et ál. (2005) estas formaciones corresponden a un gran anticlinal con un eje NNE-SSW.

### 3.3.1.3. Isla de Mallorca y Archipiélago de Cabrera

Mallorca es la isla de mayor tamaño del archipiélago y se encuentra estructurada en base a una serie de horst y graben que condicionan la fisonomía de la isla. De sureste a noroeste se diferencian las Sierras de Llevant, la cuenca de Campos, las Sierras Centrales, las cuencas neógenas de las depresiones del Raiguer y el bloque levantado de la Sierra de Tramuntana (Figura 3.7). Los escasos materiales paleozoicos que afloran en la isla se atribuyen al Carbonífero (360-300 Ma) y aparecen en la isla en una pequeña área en el Hort de Sa Cova.

Las rocas correspondientes al Mesozoico (250-65 Ma) por su parte tienen relación con la porción peninsular de la Cordillera Bética y constituyen la base de la Sierra de Tramunana. Estos materiales se pueden diferenciar en varios ciclos que se comentan a continuación:

### 3.- Descripción geológica y tectónica

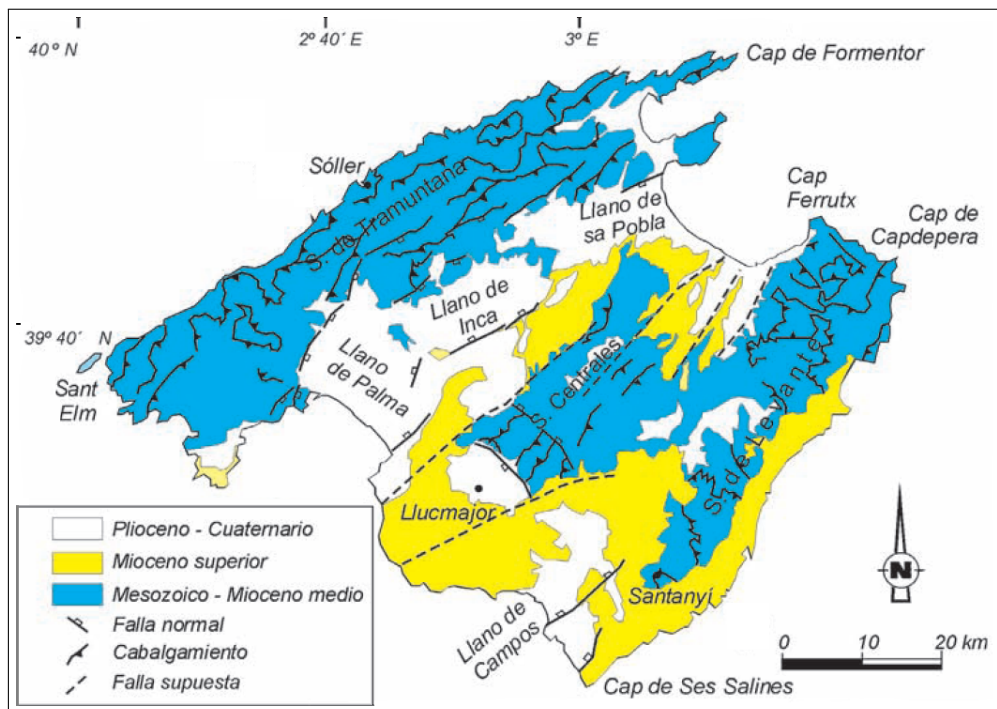


Figura 3.7: Mapa geológico y tectónico de la Isla de Mallorca. Fuente [Giménez et ál. \(2007\)](#)

- Los correspondientes a los depósitos continentales de origen fluvial de los periodos de transición con el Paleozoico (Pérmico y Triásico) que constituyen las partes inferiores de la Sierra de Tramuntana. Estos materiales están formados por areniscas cuarzosas y lutitas.
- Los pertenecientes a la unidad Triásica, relacionados con las áreas afectadas por las deformaciones alpinas. Están constituidas por lutitas margosas con niveles evaporíticos intercalados y rocas volcánicas.
- Los relacionados con el tránsito del período Jurásico, representado por calizas, dolomías oquerosas y margas. Estos materiales constituyen la base de los principales relieves de la Sierra de Tramuntana ([Durán et ál., 2006](#)).
- Los del período Jurásico, ampliamente representado en Mallorca. Se presentan en la Sierra de Tramuntana y de Llevant y están representados por materiales carbonáticos tipo dolomitas y calizas.
- Los del Cretácico, por su parte, no tienen gran representación en la isla, habiendo sólo algunos ejemplos de margas y margocalizas del Cretácico Inferior en el extremo más septentrional de las Sierras de Llevant y ciertas calizas y margas del Superior en la Sierra Tramuntana.

Respecto al Cenozoico, éste se encuentra muy representado en Mallorca desde

el Paleógeno (60 Ma) hasta la actualidad. Algunos depósitos datados en esta fecha poseen una naturaleza lacustre, con acumulaciones de materia orgánica que originaron vetas de carbón. Las secuencias pertenecientes a los depósitos creados durante la orogenia Alpina del Mioceno Inferior y Medio (20 Ma) son de naturaleza turbidítica con margas y calcarenitas. Respecto a los materiales postalpinos se depositaron en las cuencas interiores de la isla entre los relieves estructurados, alcanzando un espesor de hasta 650 m.

Al sureste de la Isla de Mallorca se encuentra el Archipiélago de Cabrera, una agrupación que con su isla principal y 18 islas menores e islotes constituye la prolongación emergida de las Sierras de Llevant. Este conjunto de islas se encuentra estructurado según un eje NNE-SSO y los materiales más antiguos de este pequeño archipiélago pertenecen al Triásico Superior, con una edad de unos 200 Ma, con materiales de tipo arcilloso y yesos. También se localizan depósitos jurásicos de dolomías y afloramientos de calizas del Cretácico Inferior. Se pueden localizar además afloramientos de calizas con fósiles de nummulites, fechados en el Eoceno (54-34 Ma), sobre todo en la isla de mayor tamaño.

#### **3.3.1.4. Islas Pitiusas**

Las islas más occidentales del Archipiélago Balear corresponden a las Pitiusas, constituidas por dos islas principales, Ibiza y Formentera. La litología que presentan se inicia con afloramientos del Triásico Medio (235 Ma) que continúan hasta el Cretácico Superior (80 Ma). Los materiales más modernos, pertenecientes al Cenozoico, tienen representación sobre todo en la Isla de Formentera.

En Ibiza los materiales más característicos son los Mesozoicos (250-65 Ma) como base de las unidades cabalgantes ([Durán et ál., 2006](#)). Se trata de depósitos carbonatados cuyos registros más antiguos se encuentran localizados en la costa nororiental de la isla; de esta época cabe destacar además depósitos del Triásico con facies de margas y lutitas rojas con areniscas (Figura 3.8). Los materiales de época Jurásica tienen presencia en toda la isla, ya que constituyen los principales relieves. En este caso son afloramientos carbonatados de fase marina, algunos de tipo dolomítico. Asimismo el Cretácico tiene presencia elevada con materiales de tipo calcáreo y margoso.

Respecto al Cenozoico, cabe destacar que los materiales del Paleógeno no están presentes en la Isla de Ibiza, posiblemente por encontrarse ya emergida, localizándose sólo ciertos conglomerados, calcarenitas y margas pertenecientes al Mioceno Inferior y Medio en la zona costera septentrional. En Formentera, por su parte, los afloramientos de esta época son los más característicos, constituidos por calizas arrecifales y calcarenitas, con presencia en toda la isla.

### 3.- Descripción geológica y tectónica

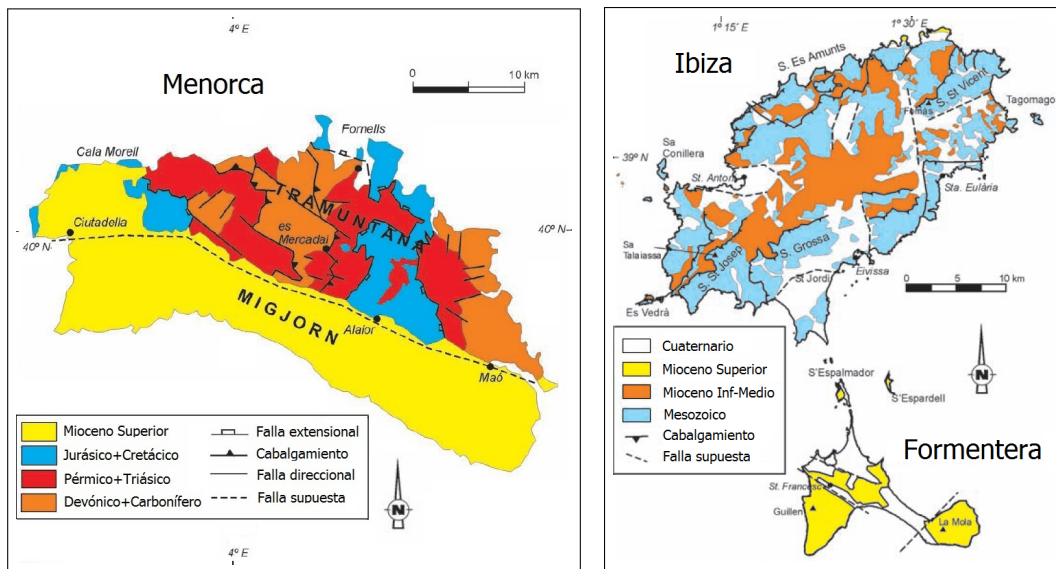


Figura 3.8: Mapa geológico y tectónico de la Isla de Menorca (izquierda) e Ibiza y Formentera (derecha). Fuente [Giménez et ál. \(2007\)](#)

#### 3.3.2. Tectónica

El Archipiélago Balear se ha visto sometido a diferentes fases tectónicas desde el Oligoceno (34 Ma) aunque las estructuras generadas no presentan la actividad sísmica de sus análogas en la Cordillera Bética. Principalmente se observan estructuras compresivas en la dirección NE-SW en prácticamente todas las islas, a excepción de Formentera, con una datación que oscila entre el Oligoceno y el Mioceno medio. Estas estructuras están en concordancia direccional con las presentes en la Cordillera Bética y son explicadas por un proceso de compresión general de ambas zonas en dirección SE-NW.

Posteriormente, coincidiendo con el final de la compresión Alpina en el Mioceno Superior, se inició un régimen extensional que formó las depresiones en las distintas islas. Este proceso es el responsable del desmembramiento del Promontorio Balear inicial en dos bloques separados. Esto coincide además con la aparición de fracturas en el fondo del promontorio que generaron extrusiones de material volcánico, presentes en el Canal de Mallorca y en la zona sur de Menorca. Asimismo provocó que las estructuras compresivas previas fueran cortadas por fallas extensionales relacionadas con este comportamiento extensivo.

Las distensiones Neógenas son las responsables de la configuración en horsts y graben presente en la Isla de Mallorca, en concreto se identifican dos graben y tres horsts limitados por fallas de dirección NE-SW. Asimismo cabe destacar la presencia de fallas que limitan las depresiones de Palma, Inca y Sa Pobla en la zona occidental y la de Campos en la oriental ([Sàbat et ál., 2011](#)). El eje extensional principal tiene una dirección WNW-WSW, perpendicular a las cuatro

estructuras comentadas, siendo las dos fallas extensionales de mayor longitud las correspondientes a la falla de Palma y la Falla de la Sierra de Llevant. En esta isla también se puede destacar la presencia de dos anticlinales con dirección NNE-SSW: el situado al este de la depresión de Palma y el de Santa Margalida. Según [Giménez et ál. \(2002\)](#), se puede deducir un desplazamiento vertical de estas estructuras de 0,1 mm/año en base al espesor de los sedimentos acumulados en la cuenca de Inca en la zona central de la isla. Existen ejemplos de estructuras compresivas y extensionales que han afectado a materiales post-alpinos en la isla ([Giménez, 2003](#)) tales como los situados en el límite sureste de la Sierra de Tramuntana asociados con el movimiento de tipo sinistro de algunas estructuras principales de la isla como la Falla de Sencelles.

Respecto a la Isla de Menorca, la deformación extensional no es tan evidente como ocurre en la isla vecina, siendo perceptibles únicamente una serie de fallas normales como límite de pequeñas cuencas al final de la compresión alpina. La presencia de una falla transversal con dirección ESE-WNW es la responsable de la separación de las dos regiones en las que se puede dividir la isla, la Tramuntana y el Migjorn, siendo el bloque situado más al sur el que muestra un hundimiento relativo respecto al septentrional.

En las Pitiusas, por su parte, las estructuras post-alpinas son menos evidentes, lo que se atribuye a la reducida actividad tectónica en el área. En la Isla de Ibiza las estructuras están cortadas por fallas de dirección NNW-SSE, mientras que en Formentera, donde los materiales más antiguos datan del Mioceno superior, no existe evidencia de actividad reciente. Un aspecto importante de la isla de Formentera es que su morfología está claramente condicionada por la presencia de fracturas en las direcciones NE-SW y NW-SE.

### **3.3.3. Sismicidad**

Es importante destacar que la sismicidad en el Archipiélago Balear es baja y no tiene la magnitud que presenta el sector más oriental de la Cordillera Bética (Figura 3.9). De cualquier modo, la existente puede ser asociada a la presencia de fallas neógenas con dirección NE-SW que en ciertos casos pueden alcanzar longitudes de hasta 20 kilómetros ([Giménez, 2008](#)). Generalmente la distribución de esa sismicidad de pequeña magnitud y origen superficial se encuentra localizada en la parte central del Promontorio Balear, zonas del Canal de Mallorca y en el área central de la isla de mayor tamaño. Entre las fallas generadoras de esta sismicidad se pueden destacar la falla de Palma, Sencelles y Sant Joan.

En el área nordeste de Menorca se registran terremotos de magnitud que oscila entre 3,5 y 4,5, asociados normalmente con la estructura Neógena ENE-WSW que separa las regiones de Tramuntana y Migjorn. Por su parte en la zona de Ibiza

### 3.- Descripción geológica y tectónica

y Formentera la sismicidad es casi inexistente en época reciente, limitándose a zonas marinas cercanas.

Debido a esta baja sismicidad no se disponen de mecanismos focales en el archipiélago. El mecanismo focal más cercano es el correspondiente al terremoto del 24 de septiembre de 1994 de magnitud 4,5 localizado a 100 kilómetros al norte de Menorca. Dicho mecanismo indica que este terremoto estuvo asociado a una falla direccional ([Braunmiller et ál., 2000](#)).

En zonas cercanas a la costa alicantina los terremotos son de mayor magnitud y algunos de ellos tienen sus mecanismos focales calculados. Éstos indican que la sismicidad está relacionada principalmente a fallas inversas E-W. Por su parte, la actividad localizada en el Golfo de Valencia esta asociada a fallas normales de dirección N-S.

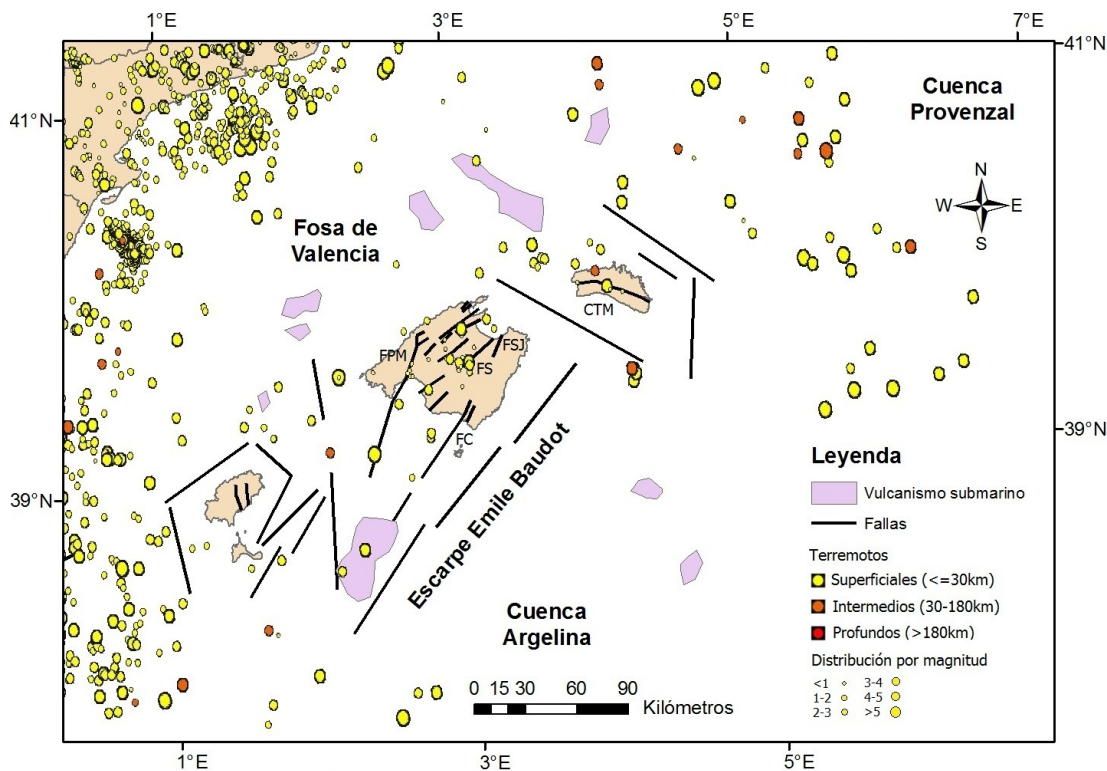


Figura 3.9: Representación de actividad sísmica en el Archipiélago Balear. Terremotos registrados en el catálogo de terremotos del IGN según magnitud y profundidad. FPM: Falla de Palma, FS: Falla de Sencelles, FSJ: Falla de Sant Joan, FC: Falla de Campos, CTM: Contacto Tramuntana-Migjorn

# 4

## Sistemas de Referencia

---

*“Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento rectilíneo y uniforme a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas impresas sobre él”*

Isaac Newton (1642-1727)

### 4.1. Conceptos Generales

La corteza terrestre está en constante cambio debido a la tectónica de placas y a las deformaciones a las que se ve sometida su superficie. Para poder monitorizar estos movimientos es importante definir un sistema al que referir las coordenadas obtenidas por las observaciones espaciales para el correcto modelizado, representación e interpretación de los resultados.

Un sistema de referencia es una definición conceptual completa de como se formaliza un sistema de coordenadas donde se incluyen además los modelos matemáticos y físicos subyacentes. Queda determinado por un origen, la orientación de planos fundamentales y unos ejes (Seeber, 2003).

En Geodesia los sistemas de referencia pueden ser locales, utilizados en técnicas de geodesia clásica al definir las observaciones directas de acimut y distancia; o globales, característicos de la geodesia espacial y utilizados en los sistemas de posicionamiento global (Figura 4.1). La razón por la que los sistemas GNSS trabajan con referencias globales se debe a que el propio movimiento de los satélites se desarrolla en torno al centro de masas de la Tierra, que se suele utilizar como origen.

Dentro de los sistemas de referencia globales tienen gran importancia en geodesia espacial los Sistemas de Referencia Celestes (CRS) y los Terrestres (TRS).

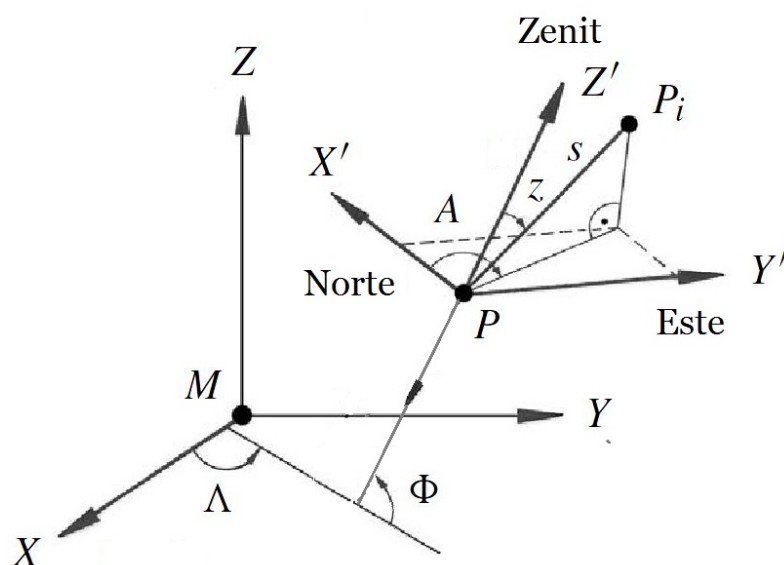


Figura 4.1: Representación del Sistema astronómico global (XYZ) y el sistema terrestre local (X'Y'Z'). Fuente Seeber (2003)

#### 4.1.1. Sistema de Referencia Terrestre (TRS)

Un Sistema de Referencia Terrestre (TRS) es un sistema de referencia espacial co-rotacional con la Tierra en su movimiento diurno. En este caso, los puntos de la superficie sólida del planeta tienen coordenadas con pequeñas variaciones en el tiempo, únicamente afectados por efectos geofísicos tales como la tectónica de placas y las deformaciones de marea.

Un TRS ideal es aquel que se define como un triedro solidario a la Tierra y co-rotacional con ella. En el marco Newtoniano, el espacio físico se considera como un espacio afín euclideo tridimensional, donde la orientación del TRS y su escala vendrán dados por la tripleta de vectores unitarios y la longitud de los mismos.

En geodesia espacial, se consideran TRS a aquellos con un origen cercano al centro de masas de la Tierra, también denominado geocentro, una orientación ecuatorial (eje Z en dirección al polo de rotación), y una escala cercana a un metro del sistema internacional. Además del cartesiano, otros sistemas de coordenadas como el geográfico pueden ser utilizadas como sistemas de coordenadas (Boucher, 2001).

Si a un TRS se le añade un conjunto de convenciones, algoritmos y constantes que proveen el origen, escala y orientación del mismo, así como su evolución temporal, se estaría hablando de un Sistema de Referencia Terrestre Convencional (CTRS), termino definido en la Asamblea de la IUGG en Viena en 1991.

Actualmente, el concepto de CTRS ha quedado sustituido por uno más específico denominado Sistema de Referencia Terrestre Geocéntrico (GTRS)([IERS, 2010](#)). Un GTRS se define como un sistema de coordenadas espacio temporales dentro del marco de la relatividad general, co-rotacional con la Tierra y relacionado con el Sistema de Referencia Celeste Geocéntrico (GCRS) por una rotación espacial que tiene en cuenta los parámetros de orientación terrestres. Sus características son:

- El Origen estaría en el geocentro, considerando todo la masa terrestre, incluyendo océanos y atmósfera.
- La referencia de tiempo de coordenadas sería el Tiempo Coordinado Geocéntrico (TCG).
- La evolución temporal de la orientación del GTRS seguiría una condición inercial (NNR) con relación a la superficie terrestre horizontal.

#### 4.1.2. Marco de referencia terrestre (TRF)

Un Marco de Referencia Terrestre (TRF) se define como la realización de un TRS a través de su origen, orientación, escala y evolución temporal. Se considera que la realización del sistema de referencia se alcanza a través de un conjunto de puntos físicos sobre la superficie terrestre que poseen coordenadas determinadas con precisión. En el caso de que este conjunto de puntos sea la realización de un TRS ideal, se estaría hablando de Marco de Referencia Terrestre Convencional (CTRF).

Puesto que los TRF están ligados a puntos físicos, sus coordenadas se refieren a una determinada época en el tiempo, ya que los puntos se ven sometidos a movimientos propios de la tectónica de placas. Se necesitan 7 parámetros para fijar los TRF a una época determinada y 14 parámetros, denominados "definición del datum" para establecer de este modo el origen, escala, orientación y evolución temporal del TRF.

Las técnicas de geodesia espacial no son susceptibles de obtener todos los parámetros de la definición del datum TRF. El origen es accesible teóricamente a través de técnicas dinámicas como SLR, GNSS y DORIS, ya que se trata del centro de masas de la Tierra. La escala depende de algunos parámetros físicos como la constante de gravitación universal, la velocidad de la luz y de modelos relativistas. La orientación, por el contrario, no puede ser observada por ninguna técnica, por lo que es arbitraria y definida de manera convencional.

Además, las observaciones geodésicas espaciales aisladas no contienen la información suficiente como para establecer completamente un TRF, se necesita información adicional para completar la definición del datum. En términos algebraicos

esto se traduce en una deficiencia de rango en la matriz normal, correspondiente al número de parámetros de datum que no se han reducido por las observaciones. Para evitar esto, los centros de análisis aplican una serie de constreñimientos de diferente magnitud para solventar esta deficiencia de rango.

Otro concepto destacado es el de *Crust-based* TRF, que se podría considerar como un marco de referencia solidario con la corteza terrestre. El modelo general relaciona la posición instantánea de un punto anclado a la corteza en una determinada época  $t$  y una posición normalizada definida por  $\vec{X}_R(t)$ . El propósito de introducir esta posición normalizada es el de borrar variaciones temporales de alta frecuencia, principalmente variaciones geofísicas, utilizando correcciones convencionales para obtener una posición con una variación temporal más estable.

## 4.2. El Sistema de Referencia ITRS

En el año 1987, por iniciativa de la Unión Astronómica Internacional (IAU) y de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica (IUGG), se estableció el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) que es el encargado de definir, realizar y promocionar el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS). Este sistema fue definido y adoptado formalmente en la Asamblea General de la IUGG en Perugia (2007) donde también se definió el GTRS, diferenciándolo del concepto general CTRS anteriormente descrito.

En las resoluciones de la XX Asamblea General de la IAG en 1991 se considera que el ITRS se define explícitamente como un sistema tridimensional que puede ser utilizado en modelos geofísicos de precisión. A partir de la Asamblea de Perugia en 2007, se amplía el concepto GTRS, estableciendo que el ITRS se pueda considerar como una parte espacial del mismo.

El procedimiento adoptado por el IERS acuerda las condiciones por las que se definiría el ITRS:

- El sistema es geocéntrico, su origen se encuentra en el centro de masas de la Tierra, incluyendo océanos y atmósfera.
- La unidad de longitud es el metro del Sistema Internacional.
- La escala es consistente con la coordenada de tiempo para un marco local geocéntrico, de acuerdo con las resoluciones del IAU y IUGG de 1991
- La orientación se establece originalmente por la definida por el Bureau Internacional de la Hora BIH en la época 1984.
- La evolución temporal de la orientación está asegurada por una condición inercial NNR en relación con los movimientos tectónicos horizontales de la Tierra.

### **4.3. Los marcos de referencia ITRF**

El IERS también es el encargado del mantenimiento de la realización del ITRS que recibe el nombre de Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF). Este marco no es estático en el tiempo sino que ha tenido diferentes versiones. La primera de ellas fue en 1988, con la definición de ITRF88, desde entonces se han concretado un total de 12 marcos hasta llegar al actualmente vigente ITRF2008.

Los comienzos de los marcos terrestres internacionales se inician en 1984, cuando se planteó un primer TRF denominado Sistema Terrestre BIH 1984 (BTS84) utilizando para ellos coordenadas de estaciones derivadas de distintas metodologías como VLBI, LLR, SLR y doppler TRANSIT/NAVSAT (Boucher y Altamimi, 1991). Desde entonces hasta 1987 se definieron un total de 3 realizaciones BTS más, hasta llegar a BTS87, cuando se creó el IERS y comenzó sus trabajos con los nuevos marcos ITRF.

Hasta ITRF2000, las características de los ITRF y su evolución fueron, en términos generales:

- La alineación de las orientaciones con sus versiones inmediatamente anteriores del marco.
- Una evolución temporal de esta orientación alineada con modelos teóricos como el NNR-NUVEL1 (Argus y Gordon, 1991) y NNR-NUVEL1A (DeMets et ál., 1994).
- El añadido de otras técnicas como el GPS (a partir de 1991) o DORIS (a partir de 1994).
- La inclusión en el cálculo de más estaciones GPS con una cobertura cada vez más global y que aumentaban la precisión en la estimación de cada marco.

#### **4.3.1. ITRF2000**

ITRF2000 intentó ser una solución estándar para georreferenciación y aplicaciones de Ciencias de la Tierra. Además de las estaciones VLBI, LLR, SLR, GPS y DORIS utilizadas hasta entonces, se densificó la red GPS en áreas geográficas que hasta entonces eran deficitarias como Alaska, la Antártida, Asia, América y el Pacífico. El resultado fue una mejora en la precisión de la estimación de este marco respecto a los anteriores. En este caso, los centros de análisis del IERS emplearon una serie de constreñimientos para generar las soluciones individuales que fueron posteriormente utilizadas para la combinación ITRF2000.

Las características del datum de este marco fueron:

- **Origen:** Calculado fijando a cero las componentes de traslación y sus variaciones entre ITRF2000 y una media ponderada de las soluciones más consistentes de SLR.
- **Orientación:** Alineada con ITRF97 en la época 1997.0.
- **Escala** Calculada fijando a cero la escala y sus variaciones a una media ponderada de las soluciones VLBI y las más consistentes de SLR.
- **Variación temporal en la orientación:** Alineada convencionalmente a la especificada por el modelo geológico NNR-NUVEL1A (DeMets et ál., 1994).

En el caso específico de la orientación, se establecieron una serie de criterios para escoger unas estaciones con alta calidad geodésica y que se utilizarían para el cálculo. Las estaciones elegidas eran aquellas con una observación continua en los últimos 3 años, localizadas en zonas rígidas de las placas tectónicas lejos de la zona de deformación, con un error formal en su velocidad mejor a 3 milímetros por año y con una velocidad residual menor a 3 milímetros por año en al menos 3 soluciones diferentes. De este modo quedaron 54 estaciones que cumplían los requisitos, garantizándose una calidad en la estimación de la orientación del marco ITRF2000.

### 4.3.2. ITRF2005

El marco ITRF2005 tiene como diferencia respecto a las versiones anteriores que utiliza como datos de entrada series temporales de posiciones de las propias estaciones. Estas series son semanales para técnicas de satélite, de 24 horas para VLBI y de estimación diaria para Parámetros de Orientación de la Tierra (EOP).

Las series temporales oficiales que son la base del marco son generadas por los servicios internacionales, también llamados Centros Técnicos (TC), que utilizan las 4 técnicas de observación (VLBI, SLR, GPS, DORIS). En concreto, las series son enviadas desde el Servicio Internacional VLBI para la Geodesia y la Astrometría (IVS), por el Servicio Internacional de Telemetría Láser (ILRS) y por el Servicio Internacional GNSS (IGS). En el momento del lanzamiento de ITRF2005, la combinación semanal de soluciones del Servicio Internacional DORIS, no estaba aún disponible.

Las características que definirían el datum ITRF2005 serían las siguientes:

- **Origen:** Calculado fijando a cero las componentes de traslación y sus variaciones respecto al centro de masas de la Tierra y promediado por una serie temporal SLR de 13 años de observaciones.

- **Orientación y variación temporal:** Alineados a ITRF2000 época 2000.0 utilizando para ello 70 estaciones de una alta calidad geodésica.
- **Escala** Calculada a partir de anular las diferencias de escala y sus variaciones respecto a una serie temporal de observaciones VLBI con una longitud de 26 años.

### 4.3.3. ITRF2008 e ITRF2013

ITRF2008 es la realización de ITRS actualmente vigente. Siguiendo la misma estrategia iniciada con ITRF2005, el nuevo marco es una solución refinada basada en el reprocesado de las soluciones de las cuatro técnicas espaciales geodésicas que han sido utilizadas hasta el momento. En este caso las series temporales que se completaron fueron de 29 años para VLBI, 26 para SLR, 12.5 para GPS y 16 años para DORIS.

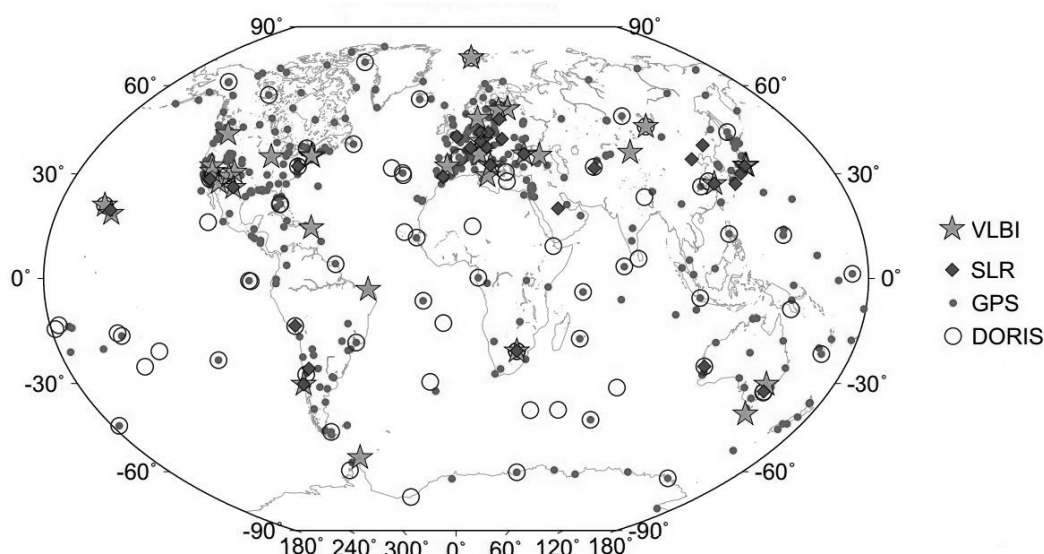


Figura 4.2: Distribución geográfica de las estaciones que participan en el marco ITRF2008. Fuente [Altamimi et ál. \(2011\)](#).

Un total de 934 estaciones distribuidas en 580 localizaciones componen el marco ITRF2008 (Figura 4.2) y, aunque el número de estaciones se ha visto incrementado sustancialmente, todavía existe un mayor número de estaciones en el Hemisferio Norte (463) frente a las 117 del hemisferio Sur. De todas ellas, 71 cuentan con dos técnicas de observación, 28 con 3 y 6 estaciones cuentan con las cuatro técnicas. Desafortunadamente solo 2 de estas últimas estaciones se

encuentran plenamente operativas: Hartebeesthoek en Sudáfrica y Greenbelt en Estados Unidos.

El datum de ITRF2008 queda definido por los siguientes parámetros:

- **Origen:** Determinado de tal modo que hace cero los parámetros de transformación y sus variaciones a época 2005.0 respecto a las series temporales de SLR generadas por el ILRS.
- **Orientación y variación temporal:** Definida de tal modo que hace cero los parámetros de rotación y sus variaciones a época 2005.0 entre ITRF2008 e ITRF2005. Estas condiciones se aplican sobre un conjunto de 179 estaciones de referencia situadas en 131 localizaciones, incluyendo 107 GPS, 27 VLBI, 15 SLR y 12 DORIS.
- **Escala** Descrito de tal modo que hace cero el factor de escala y sus variaciones a época 2005.0 respecto a la escala media y variaciones derivadas de las series temporales de VLBI y SLR.

Los sucesivos marcos han mejorado sustancialmente con la incorporación de nuevas estaciones con una o varias técnicas de observación, asumiendo una distribución cada vez más global y solventando las deficiencias que tenían los primeros marcos. De hecho, se ha pasado de una red que incluía 100 estaciones de observación con 22 de varias técnicas (VLBI/SLR/LLR) en ITRF88 a las 580 con 105 estaciones de varias técnicas (VLBI/SLR/GPS/DORIS) en el marco actual ITRF2008.

En la actualidad se encuentra en preparación una nueva realización de ITRS que vendría a denominarse ITRF2013. Aunque ITRF2008 marcó un considerable progreso respecto a los anteriores marcos, desde que se estableció éste se han instalado nuevas estaciones, algunas de ellas con más de una técnica, y se han producido varios terremotos de gran magnitud que han deformado extensas zonas sobre regiones continentales. Por estos motivos, y sirviéndose de la ampliación de las series temporales en estos 5 años, el IERS ha decidido implementar esta nueva versión del marco.

Se espera que en abril de 2014, coincidiendo con la asamblea general de la EGU, se publiquen los primeros resultados y discusiones del nuevo marco, terminando en agosto de 2014 la solución final ITRF2013 para que a partir de esa fecha esté a disposición de los usuarios.

#### 4.3.4. Parámetros de transformación

Para transformar las coordenadas de un sistema de referencia terrestre a otro es necesario conocer un vector de traslación, un factor de escala y una matriz de rotación entre ambos sistemas. Comúnmente se utiliza la transformación tridimensional euclídea de 7 parámetros, 3 componentes de traslación  $(T_1, T_2, T_3)$ , 3 ángulos de rotación  $(R_1, R_2, R_3)$  y un factor de escala  $D$ . De este modo, la transformación de un vector de coordenadas  $\vec{X}_1$ , expresado en el sistema de referencia (1) a un vector de coordenadas  $\vec{X}_2$ , expresado en el sistema de referencia (2), se daría de la siguiente manera:

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_1 + \vec{T} + D\vec{X}_1 + R\vec{X}_1 \quad (4.1)$$

donde  $\vec{T}$  y  $R$  son los vectores de traslación y la matriz de rotación entre ambos sistemas respectivamente y  $D$  es el factor de escala. Más concretamente se pueden desarrollar estos términos con los componentes definidos anteriormente:

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} 0 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 0 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Generalmente los parámetros de esta transformación son función del tiempo, aunque sus variaciones son insignificantes. El orden de magnitud estaría en los 10 centímetros por año en traslación y 0,1 mm cada 100 años en rotación y factor de escala (IERS, 2010).

En la tabla 4.1 se muestran los parámetros de transformación y los índices de variación asociados de ITRF2008 a versiones anteriores del marco hasta ITRF97. Estos parámetros son valores ajustados con unos pesos determinados, y su estimación depende del número de estaciones consideradas y su distribución. Este aspecto es variable entre las distintas realizaciones ITRS.

Las coordenadas de una estación en un determinado marco ITRF $y$  están referidas a una época concreta, en el caso de ITRF2008 a época 2005.0. Para determinar la posición de una estación en una época distinta  $t$  se utilizan las coordenadas  $(\vec{X}_o)$  en la época de referencia  $t_o = 2005,0$  junto a una velocidad asociada  $\dot{\vec{X}}$  mediante la ecuación:

$$\vec{X}(t) = \vec{X}_o + \dot{\vec{X}}(t - t_o) \quad (4.3)$$

Asimismo, el valor de cada parámetro ITRF en cualquier época  $P(t_c)$  se puede obtener teniendo en cuenta la tasa de cambio anual del mismo  $\dot{P}$  y el valor del parámetro  $P$  en la época de referencia. En el caso concreto de época 2000.0, la expresión a aplicar sería la siguiente:

$$P(t_c) = P(2000,0) + \dot{P}(t_c - 2000,0) \quad (4.4)$$

Solución	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$D$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
ITRF	(mm)	(mm)	(mm)	(ppb)	(mas)	(mas)	(mas)
Ratios	$\dot{T}_1$	$\dot{T}_2$	$\dot{T}_3$	$\dot{D}$	$\dot{R}_1$	$\dot{R}_2$	$\dot{R}_3$
	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)	(ppb/año)	(mas/año)	(mas/año)	(mas/año)
ITRF97	4.8	2.6	-33.2	2.92	0.00	0.00	0.06
ratios	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02
ITRF2000	-1.9	-1.7	-10.5	1.34	0.00	0.00	0.00
ratios	0.1	0.1	1.8	0.08	0.00	0.00	0.00
ITRF2005	-2.0	-0.9	-4.7	0.94	0.00	0.00	0.00
ratios	0.3	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 4.1: Parámetros de transformación de ITRF2008 a ITRFs anteriores todos a época 2000.0, las unidades de las traslaciones son en milímetros (mm), el factor de escala está en partes por billón (ppb) o  $10^{-9}$  y las rotaciones en milisegundos de arco (mas). Las unidades de los ratios están por unidad de tiempo (año). Fuente <http://itrf.ensg.ign.fr/>

## 4.4. Los marcos de referencia IGS

### 4.4.1. El Servicio Internacional GNSS (IGS)

El Servicio Internacional GNSS (IGS), creado por la IAG en 1994, es el encargado de distribuir datos y productos GNSS de alta calidad para satisfacer los objetivos de estudios multidisciplinarios tales como la generación del marco ITRF, el control de deformaciones de la superficie terrestre, la determinación de órbitas de satélites y estudios atmosféricos. Para ello recopila, almacena y distribuye datos de observaciones GNSS de estaciones alrededor del globo, generando productos asociados.

Para desarrollar su cometido, el IGS dispone de una red internacional de unas 350 estaciones permanentes GNSS doble frecuencia (Figura 4.3) apoyadas por más de una docena de centros regionales de datos coordinados por 3 centros de datos globales. El análisis de los datos recopilados es llevado a cabo por 7 centros globales y varios centros de análisis regionales.

El encargado de la correcta información y acceso a los productos IGS es el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) del Instituto de Tecnología de California, el cual tiene una FTP habilitada para la descarga de datos GNSS y productos (<ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/>). Los datos disponibles van desde las efemérides de los satélites GPS y GLONASS, pasando por los parámetros de rotación terrestre, coordenadas y velocidades de las estaciones de la red, estado de relojes, retardos cenitales troposféricos y mapas globales de ionosfera.

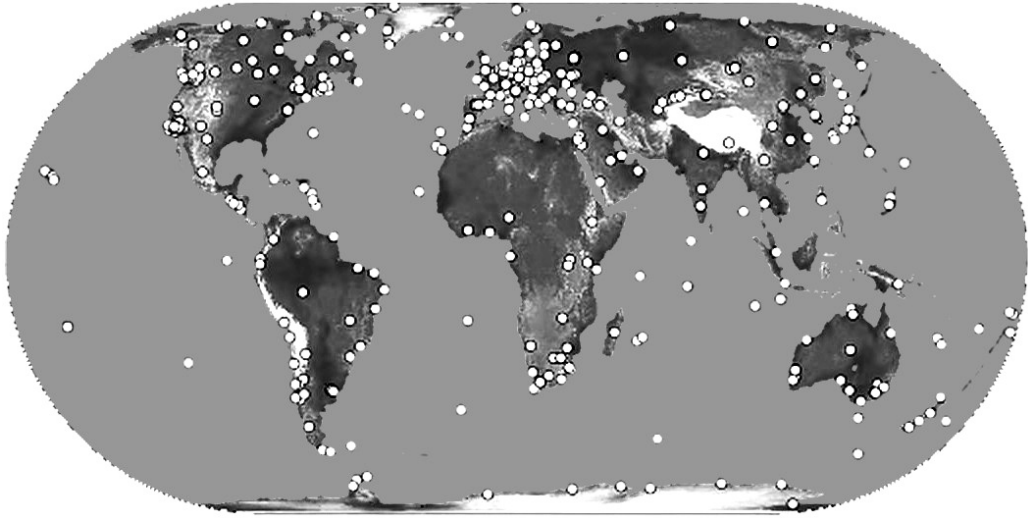


Figura 4.3: Distribución geográfica de las estaciones IGS. Fuente <http://igsb.jpl.nasa.gov/>

#### 4.4.2. Desarrollo de los Marcos IGS

Puesto que las realizaciones de ITRS en los distintos marcos ITRF son generadas a partir de varias técnicas de observación, se producen distorsiones e inconsistencias al generar los productos de IGS, ya que éste trabaja solamente con estaciones GNSS. Es por ello que a partir de ITRF97, paralelamente al marco ITRF general, se están estableciendo nuevos marcos propios GNSS donde se encuentran únicamente las estaciones de IGS que a su vez sirven de referencia para sus productos.

Desde entonces se han implementado varios marcos IGS como son: IGS97, IGS00, IGS05, IGS08 y el más reciente IGS08. Todos ellos tienen la característica de que sus datums están alineados con sus respectivos marcos generales ITRF (ITRF2000, ITRF2005 e ITRF2008). Las diferencias principales entre todos ellos estarían, por un lado, con el número de estaciones de referencia que definen cada marco, ya que se ha pasado de 51 estaciones para IGS97 hasta los 232 de IGS08 (Rebischung et ál., 2012) y, por otro, cabe destacar el tema de las calibraciones de las antenas de las estaciones y satélites, ya que a partir de IGS05 se comenzaron a utilizar las calibraciones de fase absolutas que sustitúan a las relativas.

Una característica importante de los productos que genera IGS es que están definidos para el marco que esté en vigor en ese momento. Esto produce discontinuidades y saltos en las series temporales de coordenadas en las estaciones que utilizan estos productos para su procesamiento, ya que van ligadas al marco IGS. En la tabla 4.2 se muestran los períodos de validez de estos marcos desde IGS97:

marco IGS	fecha entrada	Semanas GPS	Vigencia DOY
IGS97	04/06/2000	1065-1142	156/2000-336/2001
IGS00	02/12/2001	1143-1252	336/2001-010/2004
IGb00	11/01/2004	1253-1399	011/2004-308/2006
IGS05	05/11/2006	1400-1631	309/2006-106/2011
IGS08	17/04/2011	1632-1708	107/2011-280/2012
IGb08	07/10/2012	1709-actual	281/2012-actual

Tabla 4.2: Períodos de vigencia de los marcos IGS entre IGS97 e IGb08. Se muestran las fechas de entrada del marco y la vigencia en semanas GPS y día del año. Fuente <http://igscb.jpl.nasa.gov/>

Para homogenizar los productos de IGS, se está procediendo a dos reprocesamientos de los productos generados por los centros de análisis para ligarlos así a un marco homogéneo IGS. El primero de ellos, comunmente conocido como REPRO1, se desarrolló en 2008-2009 y trataba de pasar los productos al marco IGS05 vigente entonces, otra razón para este cálculo fue la inclusión de las calibraciones absolutas de las antenas que se llevó a cabo a partir de la semana GPS 1400. En la actualidad se está planteando además un segundo reprocesamiento, denominado REPRO2, que tiene previsto desarrollarse a finales de 2013 y que buscará ligar todos los productos de IGS al nuevo marco IGb08.

## 4.5. El Sistema de Referencia ETRS89

La subcomisión de la IAG para el Marco de Referencia Europeo (EUREF) es la encargada del mantenimiento del Sistema de Referencia Terrestre Europeo (ETRS89) en base a su red permanente de estaciones GNSS (Figura 4.4). Su origen y desarrollo vienen motivados por la adaptación del sistema de referencia internacional ITRS al ámbito del continente europeo.

En 1987, la IAG y el *Comite European des Responsables de la Cartographie Officielle* (CERCO) decidieron desarrollar un nuevo marco de referencia geodésico europeo basado en observaciones GPS. Esta referencia debería tener versatilidad y una dimensión continental para ser aplicada a las distintas bases de datos cartográficas digitales. Se pretendía evitar los múltiples datums nacionales en Europa y unificar los sistemas de referencia nacionales para la topografía, cartografía, sistemas de información geográfica y navegación.

A finales de la década de 1980, el ITRS era el sistema de referencia global disponible con mayor precisión y EUREF decidió basar la nueva referencia a este sistema, que a su vez era respaldado por IERS. Sin embargo debía adaptarlo al continente, ya que en el sistema global ITRS las placas tectónicas causaban que

las coordenadas de las estaciones europeas cambiaran lentamente a una velocidad de 2.5 centímetros por año.

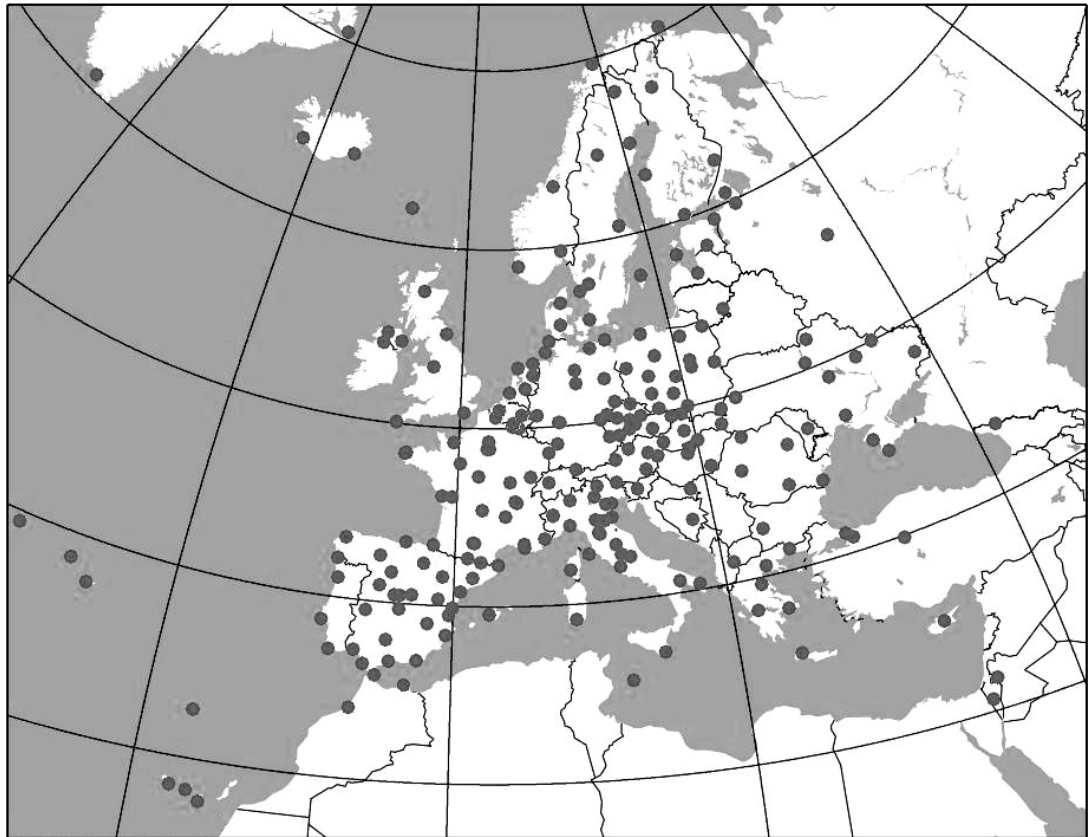


Figura 4.4: Distribución geográfica de las estaciones EUREF en el continente europeo y zonas próximas. Fuente <http://www.epncb.oma.be/>

Para solventar este problema, se seleccionaron un total de 35 estaciones Europeas SLR y VLBI, que eran parte de la solución general ITRF, para calcular una solución particular para Europa a época 1989.0. Las coordenadas geocéntricas obtenidas fueron la base que definiría el Marco de Referencia Europeo (ETRF89), como subconjunto de la solución ITRF89 y origen posterior de ETRS89 (Adam et ál., 2000)

Fue en el Simposio de Florencia de 1990 cuando EUREF designó el nuevo sistema (ETRS89) de tal forma que coincidiera con ITRS en la época 1989.0. El nuevo sistema estaba ligado a la parte estable de la placa Europea, fijando de este modo las relaciones entre las estaciones del continente.

### 4.5.1. Transformación de coordenadas a ETRS89

A partir de un determinado ITRFyy se puede establecer un marco específico en ETRS89 para el continente europeo que recibe el nombre de ETRFyy. Para obtener este marco es necesario seguir los siguientes pasos (Boucher y Altamimi, 2011):

- Seleccionar los puntos pertenecientes a ITRF localizados en el continente europeo.
- Mediante el ajuste de la ecuación 4.3 con los parámetros adecuados, llevar las coordenadas ITRFyy a época 1989.0.
- Aplicar una traslación para pasar las coordenadas de ITRFyy a ETRFyy en la época 1989.0.
- Mediante una matriz de rotación aplicada a las velocidades en ITRFyy, obtener las velocidades en ETRFyy.

Puesto que ETRF89 se deriva de ITRF89 (Boucher y Altamimi, 1991), y que es a su vez la realización inicial de ETRS89, las traslaciones para pasar de ITRFyy a ETRFyy se corresponden con los offsets globales en la época 1989.0 entre ITRFyy e ITRF89. Las rotaciones aplicadas a la velocidad serían las 3 componentes del vector velocidad angular de la placa Euroasiática en la versión ITRFyy. En total, la expresión a utilizar para obtener ETRS89 a partir de un marco ITRF consta de los parámetros de transformación que vienen reflejados en la ecuación 4.5 y que están definidos en la tabla 4.3 (Boucher y Altamimi, 2011).

$$X^E(t_c) = X_{YY}^I(t_c) + T_{YY} + \begin{pmatrix} 0 & -\dot{R}_3 & \dot{R}_2 \\ \dot{R}_3 & 0 & -\dot{R}_1 \\ -\dot{R}_2 & \dot{R}_1 & 0 \end{pmatrix} X_{YY}^I(t_c) (t_c - 1989,0) \quad (4.5)$$

donde:

$t_c$	Época origen de las coordenadas
$X^E(t_c)$	Coordenadas ETRS89 en la época $t_c$
$X_{YY}^I(t_c)$	Coordenadas en el marco origen ITRFyy en la época $t_c$
$T_{YY}, \dot{R}_1, \dot{R}_2, \dot{R}_3$	Vector de traslaciones y rotaciones, ver tabla 4.3

Para armonizar futuras realizaciones de ETRS89, el grupo de trabajo encargado de EUREF recomienda adoptar el marco ETRF2000 como marco convencional de ETRS89. Esto implica que, previamente a los cálculos ordinarios comentados

ITRF <sub>y</sub>	$T_1$ (cm)	$T_2$ (cm)	$T_3$ (cm)	$\dot{R}_1$ (mas/año)	$\dot{R}_2$ (mas/año)	$\dot{R}_3$ (mas/año)
ITRF89	0.0	0.0	0.0	0.110	0.570	-0.710
ITRF90	1.9	2.8	-2.3	0.110	0.570	-0.710
ITRF91	2.1	2.5	-3.7	0.210	0.520	-0.680
ITRF92	3.8	4.0	-3.7	0.210	0.520	-0.680
ITRF93	1.9	5.3	-2.1	0.320	0.780	-0.670
ITRF94	4.1	4.1	-4.9	0.200	0.500	-0.650
ITRF96	4.1	4.1	-4.9	0.200	0.500	-0.650
ITRF97	4.1	4.1	-4.9	0.200	0.500	-0.650
ITRF2000	5.4	5.1	-4.8	0.081	0.490	-0.792
ITRF2005	5.6	4.8	-3.7	0.054	0.518	-0.781

Tabla 4.3: Parámetros de transformación para pasar de ITRF<sub>y</sub> a ETRS89 (marco ETRF<sub>y</sub>), las traslaciones están en centímetros (cm) y las rotaciones en milisegundos de arcos por año (mas/año). Fuente <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>

anteriormente, se transformen las coordenadas desde ITRF<sub>y</sub> a ITRF2000 para tener las coordenadas ETRS89 en el marco ETRF2000 (Tabla 4.4).

El uso de ETRF2000 tiene una ventaja respecto al resto de marcos ya que minimiza las velocidades horizontales residuales en todo el continente. En la zona de centroeuropa la magnitud de esta velocidad es de 1 milímetro al año mientras que alcanza valores de hasta 1 centímetro al año en zonas de deformación como Italia y Grecia. Esto es debido a que el marco se fundamenta en la parte estable del continente desviándose en las zonas de contacto.

#### 4.- Sistemas de Referencia

Solución	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$D$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
ITRF	(mm)	(mm)	(mm)	(ppb)	(mas)	(mas)	(mas)
Ratios	$\dot{T}_1$	$\dot{T}_2$	$\dot{T}_3$	$\dot{D}$	$\dot{R}_1$	$\dot{R}_2$	$\dot{R}_3$
	(mm/año)	(mm/año)	(mm/año)	(ppb/año)	(mas/año)	(mas/año)	(mas/año)
ITRF89	24.3	10.7	42.7	-5.97	0.891	5.390	-8.772
ratios	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF90	29.3	34.7	4.7	-2.57	0.891	5.390	-8.772
ratios	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF91	27.3	30.7	-11.3	-2.27	0.891	5.390	-8.772
ratios	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF92	39.3	44.7	-17.3	-0.87	0.891	5.390	-8.772
ratios	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF93	76.1	46.9	-19.9	-2.07	2.601	6.870	-8.412
ratios	2.9	0.2	0.6	-0.01	0.191	0.680	-0.862
ITRF94	47.3	46.7	-25.3	-1.58	0.891	5.390	-8.772
ratios	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF96	47.3	46.7	-25.3	-1.58	0.891	5.390	-8.772
ratios	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF97	47.3	46.7	-25.3	-1.58	0.891	5.390	-8.772
ratios	0.0	0.6	1.4	-0.01	0.081	0.490	-0.812
ITRF2000	54.0	51.0	-48.0	0.00	0.891	5.390	-8.712
ratios	0.0	0.0	0.0	0.00	0.081	0.490	-0.792
ITRF2005	54.1	50.2	-53.8	0.40	0.891	5.390	-8.712
ratios	-0.2	0.1	-1.8	0.08	0.081	0.490	-0.792
ITRF2008	52.1	49.3	-58.5	1.34	0.891	5.390	-8.712
ratios	0.1	0.1	-1.8	0.08	0.081	0.490	-0.792

Tabla 4.4: Parámetros de transformación de ITRFyy a ETRF2000 a época 2000.0, las unidades de las traslaciones son en milímetros (mm), el factor de escala está en partes por billón (ppb) o  $10^{-9}$  y las rotaciones en milisegundos de arco (mas). Las unidades de los ratios están por unidad de tiempo (año). Fuente <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>

## 4.6. El Sistema Geodésico WGS84

Desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos desde 1960, el sistema de coordenadas WGS84 es un sistema de referencia terrestre convencional (CTRS) que sigue las recomendaciones definidas en las convenciones de IERS (IERS, 2010). Tanto WGS84 como su versión anterior WGS72 se utilizaron para calcular las efemérides transmitidas operacionales de los satélites TRANSIT/NAVSAT y GPS, ésta es la principal razón de la gran aceptación que tiene WGS84 como sistema de coordenadas de referencia y por lo que se utiliza actualmente en el sistema GPS.

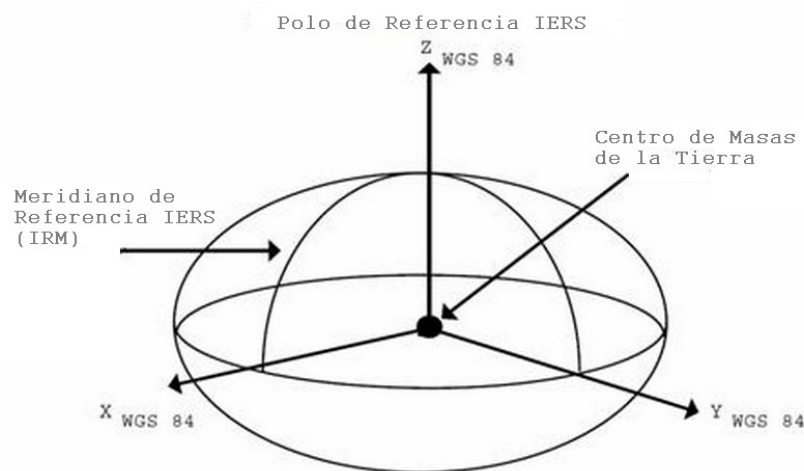


Figura 4.5: Sistema de referencia WGS84, definición de ejes y origen. Fuente DMA TECHNICAL REPORT TR8350.2-b (1987) <http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/tr8350.2/TR8350.2-b/Sections%201-5.pdf>

La organización responsable del establecimiento y mantenimiento del WGS84 es la NGA, anteriormente denominado NIMA y DMA. Un completo estudio con información detallada del sistema se puede encontrar en NIMA (2000).

WGS84 es un sistema cartesiando de coordenadas ortogonal fijo a la Tierra que prácticamente coincide con el Sistema de Referencia Geodésico 1980 GRS80, siendo el campo de gravedad asociado el Modelo Gravitacional Terrestre 1996 (EGM96) (Lemoine et ál., 1998). La definición del triedro vendría en la figura 4.5 y sería la siguiente:

- **Eje Z:** En la dirección del Polo de Referencia del IERS que corresponde a la dirección del Polo Terrestre Convencional del BIH en la época 1984.0.

- **Eje X:** Intersección del Meridiano de Referencia del IERS (IRM) y el plano que pasa por el centro de masas de la Tierra perpendicular al eje Z. Este Meridiano IRM coincide con el meridiano cero del BIH en la época 1984.0.
- **Eje Y:** Formando la terna ortogonal directa y perpendicular a los ejes anteriores.

Parámetro	Nombre	GRS80	WGS84
Semi-eje mayor	$a$	6378137	6378137
Aplanamiento	$\omega$	1/298.257222101	1/298.257223563
Velocidad angular	$f$	7.292115 $10^{-5}rad/s$	7.292115 $10^{-5}rad/s$
Constante de gravitación	$GM$	398600.5 $km^3/s^2$	398600.4418 $km^3/s^2$

Tabla 4.5: Parámetros principales de los elipsoides GRS80 y WGS84. Fuente [Seeber \(2003\)](#)

Para la definición del elipsoide se eligió uno con características geocéntricas y de revolución con los parámetros de semieje mayor  $a$ , aplanamiento  $f$ , constante gravitacional de la Tierra  $GM$  y velocidad angular de rotación  $\omega$  que vienen descritos en la tabla 4.5, en la misma vienen también reflejados los valores para el GRS80 adoptado en la XVII Asamblea General de la IUGG. Originalmente el GRS80 fue utilizado como sistema de referencia base para el WGS84, aunque actualmente difieren ligeramente debido a las nuevas versiones del marco WGS84 que se han ido implementando.

#### 4.6.1. Desarrollo de las realizaciones WGS84

La primera realización de WGS84 fue llevada a cabo mediante observaciones Doppler TRANSIT, estimando las coordenadas de las estaciones con una desviación aproximada de 1-2 metros con el marco ITRF. Esto era debido a que para la realización de WGS84 se utilizaron observaciones del sistema TRANSIT/NAVSAT mientras que para ITRF se incluyeron observaciones SLR y VLBI. Se buscaba alinear lo más posible este marco WGS84 al del BTS en la época 1984.0.

Posteriormente se obtuvieron los parámetros de transformación correspondientes con ITRF90 y se comprobó una diferencia significativa entre la constante gravitacional de la Tierra utilizada en ITRF respecto a la de WGS84. Esto producía diferencias apreciables en la estimación de las órbitas de los satélites GPS.

Para corregir estas divergencia se mejoró el marco original WGS84, utilizando para ello medidas GPS y recalculando las coordenadas del Segmento de Control GPS en ITRF91 a época 1994.0 ([Malys y Slater, 1994](#)). Se rectificó además el dato

de la Constante Gravitacional con los valores estándar del IERS. El resultado del nuevo marco de referencia WGS84, designado como G730, fue implementado en el procesado de efemérides el 2 de enero de 1994 y empleado por la MCS GPS el 29 de junio de 1994. La implementación de este marco de referencia permitió una mejora sustancial de la precisión, ya que en comparación con ITRF92 mostraba ya un acuerdo inferior a los 10 centímetros.

En septiembre de 1996 las coordenadas de las estaciones de control GPS fueron de nuevo recalculadas con el nuevo marco designado como WGS84 G873 a época 1997.0. Las nuevas coordenadas fueron incluidas el 29 de junio de 1997 ([Malys et ál., 1997](#)) y, aunque los cambios no fueron detectados por muchos usuarios GPS, permitió que el marco WGS84 fuera consistente con ITRF94 al nivel de 2-5 centímetros.

La tercera realización WGS84 fue la G1150, implementada por el Segmento de Control Operacional GPS el 20 de enero de 2002, siendo la época de referencia del marco la 2001.0. Esta realización coincide además con un aumento considerable en el número de estaciones IGS y con el establecimiento de un mayor número de estaciones permanentes nacionales y regionales. Las precisiones alcanzadas en este caso son de diferencias de alrededor de 1 centímetro ([Merrigan et ál., 2002](#)) entre esta realización WGS84 y la versión ITRF2000, pasada a época 2001.0.

La cuarta, y hasta ahora última realización del marco, es la WGS84 (G1674) que está alineada con ITRF2008 a época 2005.0. Esta nueva versión fue introducida el 8 de febrero de 2012 y trajo consigo una nueva mejora en la precisión respecto a la versión previa G1150 con diferencias estimadas inferiores al centímetro respecto a ITRF2008.



# 5

## Los Sistemas GNSS

---

*“Los planetas en su movimiento  
alrededor del Sol describen elipses,  
con el Sol ubicado en uno de sus  
focos”*

Johannes Kepler (1571-1630)

### 5.1. Descripción de los Sistemas GNSS

En la actualidad existen varios sistemas GNSS disponibles para proveer de un posicionamiento global al usuario mediante coordenadas precisas. Los sistemas GPS y GLONASS son los que están completamente operacionales mientras que Beidou-2/COMPASS, Galileo y algunos otros se encuentran en fase de desarrollo.

#### 5.1.1. El Sistema GPS

EL NAVSTAR/GPS es un sistema de posicionamiento espacial desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América en 1973. Sus orígenes se inician a partir del desarrollo de dos proyectos norteamericanos, por un lado del proyecto TIMATION implementado por el Laboratorio de Investigación Naval de la Marina en 1950, que consistía en satélites dotados de osciladores de cuarzo que generaban una radiofrecuencia en las bandas UHF y VHF y, por otro, del proyecto 621B de la Fuerza Aérea con inicios en 1960 y que consistía en el posicionamiento de aeronaves a partir de estaciones en tierra con la generación de señales codificadas.

El GPS venía a sustituir al TRANSIT/NAVSAT, un sistema de posicionamiento con origen en 1967 y que analizaba el efecto Doppler producido en las

dos frecuencias que emitían los satélites de la constelación NAVSAT. El efecto Doppler tiene la característica de poder calcular la distancia a partir de la cuenta integrada Doppler o número de ciclos recibidos y la longitud de onda de la señal. Los satélites de esta constelación tenían órbitas cuasi-circulares, polares y con una altitud aproximada de 1100 kilómetros.

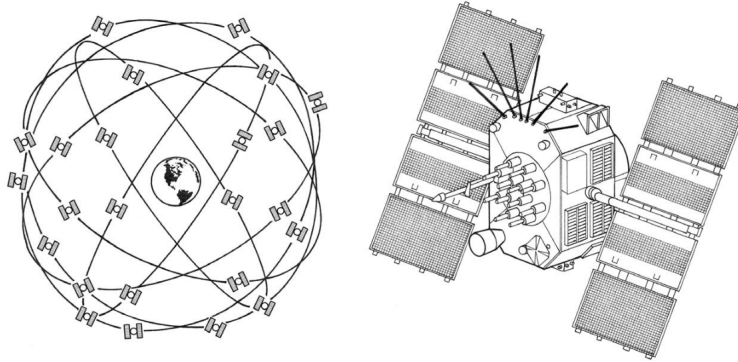


Figura 5.1: Representación de la constelación GPS con las órbitas y visión esquemática de un satélite del bloque II/IIa. Fuente [Seeber \(2003\)](#)

El NAVSTAR/GPS fue definido desde sus orígenes como un sistema pasivo de navegación en los que los satélites son los emisores de radiofrecuencias. Proporciona un marco de referencia espacio-temporal con cobertura global, independiente de las condiciones atmosféricas y de forma continua en cualquier lugar de la Tierra, ventajas estas últimas que han hecho que el sistema sea ampliamente utilizado en la actualidad ([Seeber, 2003](#)) (Figura 5.1).

Una característica importante que poseía el sistema desde su origen fue la *Selective Availability* o Disponibilidad Selectiva (Figura 5.2). Debido al carácter militar del GPS, se añadía una degradación intencionada de la señal GPS con el fin de evitar una excesiva precisión en la determinación de la posición. Lo que en un principio buscaba evitar el uso del sistema en contra de los Estados Unidos permitió el desarrollo de la técnica diferencial de posicionamiento con dos receptores. Esta técnica está basada en el tratamiento interferométrico de la señal emitida por un mismo satélite y proporciona un posicionamiento relativo de alta precisión entre diferentes estaciones que reciban la señal simultáneamente. Esta aplicación no prevista del GPS hizo que en 1983 el Departamento de Defensa de Estados Unidos desclasificara parcialmente el sistema y que en 2000 fuera eliminada totalmente la disponibilidad selectiva ([Zumberge y Gendt, 2001](#)).

Debido a la enorme versatilidad que ofrecía, el sistema ha sido utilizado en el campo de la geodesia y la geofísica desde la década de 1980, antes incluso de que la constelación estuviera completa. Las prestaciones que aportaba dependían del tiempo de observación, si el receptor que se utilizaba era mono o bifrecuencia

y de la técnica de observación. Básicamente se generalizaron dos grandes grupos de estas técnicas, por un lado las llamadas *cinemáticas*, que se centraban en la determinación de posiciones en movimiento, y las *estáticas*, donde el receptor estaba un tiempo determinado en una situación fija para obtener la posición (Misra y Enge, 2001).

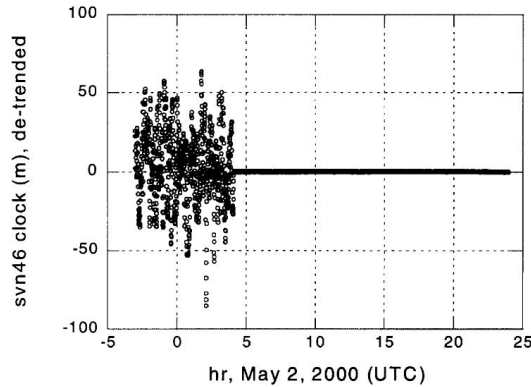


Figura 5.2: Efectos de la disponibilidad selectiva en las estimaciones de reloj cada 30 segundos. Se observa como el 2 de mayo de 2000 a las 04:00 las fluctuaciones en la estimación descendieron sensiblemente. Fuente Zumberge y Gendt (2001)

### 5.1.2. El Sistema GLONASS

El Sistema GLONASS es un sistema de posicionamiento espacial operado por la Fuerza de Defensa Aeroespacial Rusa que provee de posición, navegación y tiempo a los usuarios en modo abierto. Los satélites de esta constelación se encuentran localizados en órbita circular a unos 19100 kilómetros de altitud sobre la superficie terrestre y con una inclinación de 64.8 grados respecto al Ecuador. Al igual que el sistema NAVSTAR/GPS, GLONASS utiliza los principios de triangulación espacial para implementar la posición del observador mediante una constelación de satélites en órbita.

Los inicios de este sistema comenzaron en la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas en el año 1967 con el lanzamiento a órbita del primer satélite de posicionamiento. A partir de entonces se efectuaron más lanzamientos hasta completar un total de tres satélites que, con una órbita a 1000 kilómetros de altura y una inclinación de 83 grados, facilitaba una estimación de posición con errores de unos cientos de metros.

A partir de 1982 se iniciaron los lanzamientos de los satélites de la constelación GLONASS, que no se completó hasta que los 24 satélites fueron totalmente operacionales en 1995, ya bajo la Federación Rusa. Los continuos problemas financieros que siguieron al colapso de la Unión Soviética, trajeron problemas de

mantenimiento en la constelación que quedó reducida a solo 6 satélites operacionales. Esto fue corregido con nuevos lanzamientos a partir de 2000 cuando el gobierno ruso puso en prioridad el sistema y en mayo de 2007 cuando el servicio de navegación fue completamente libre para el uso civil. En la actualidad la administración rusa continúa el mantenimiento de la constelación con el lanzamiento de nuevas generaciones de satélites como GLONASS-M y GLONASS-K (2011) añadiendo mejoras sustanciales que aumentan la precisión en el posicionamiento, con nuevas señales de navegación civiles y frecuencias adicionales (Figura 5.3).

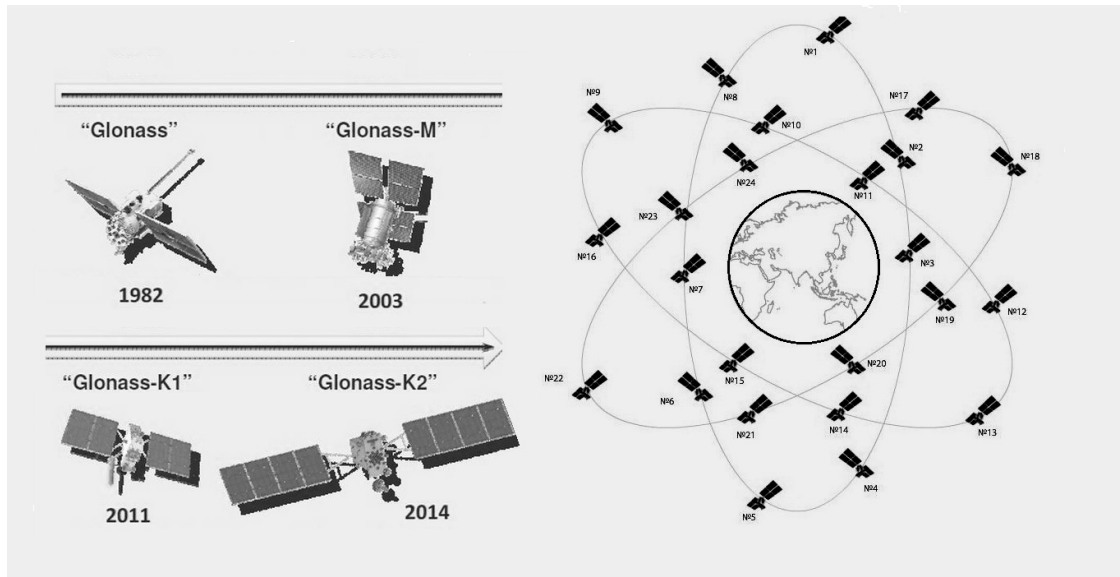


Figura 5.3: Representación de la constelación GLONASS con la serie de satélites y la distribución espacial de la constelación. Fuente [www.navipedia.net](http://www.navipedia.net)

Desde 1996 GLONASS emite en 3 frecuencias  $G1$ ,  $G2$  y  $G3$ , con la señal modulada de precisión estandar sobre la  $G1$  y la señal de alta precisión sobre la  $G1$  y  $G2$ . A partir de GLONASS-M la señal de precisión estandar también es modulada sobre  $G2$  y en los modernos satélites GLONASS-K se proveerá de la tercera frecuencia  $G3$ . Básicamente, la principal diferencia entre los sistemas GPS y GLONASS es que el sistema ruso utiliza la tecnología FDMA sobre  $G1$  y  $G2$  (Hein et ál., 2006) para distinguir las señales entre los satélites de la constelación, transmitiendo los mismos códigos con ligeras diferencias entre ellos en las frecuencias portadoras. Con esta técnica, las frecuencias son derivadas de unas consideradas como fundamentales siguiendo este patrón:

$$\begin{aligned} f_{1k} &= 1602,000 + 0,5625k \\ f_{2k} &= 1246,000 + 0,4375k \\ f_{3k} &= 1204,704 + 0,4230k \end{aligned} \quad (5.1)$$

donde  $k$  diferencia los canales de frecuencia (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008) y una triplete diferente es asignada para cada satélite GLONASS permitiendo

ser identificados por el receptor. Después de 2005 los satélites se han organizado en 12 canales de frecuencia, asignando los mismos canales a satélites situados en las antípodas y el mismo plano orbital. Está previsto que el nuevo bloque GLONASS-K (2011) incluya las nuevas señales civiles G3PT, G1CR y G5R que serán moduladas con la técnica CDMA para que puedan ser interoperativos con otros sistemas GNSS.

El marco original de coordenadas al que se refieren las posiciones de los centros de fase de las antenas de los satélites GLONASS es el *Parametry Zemli 1990* (PZ-90). Con el objeto de una mayor interoperatividad con otros sistemas, los nuevos planes de modernización llevados a cabo en septiembre de 2007 buscaron un mejor alineamiento de PZ-90 con el marco ITRF y el ajuste del sistema de tiempo GLONASS con UTC. La Agencia Espacial Rusa, encargada del mantenimiento del sistema GLONASS, dispone de la web <http://glonass-iac.ru/en/index.php> con datos de la constelación e información actualizada.

### 5.1.3. El Sistema Galileo

Galileo es una iniciativa europea que pretende servir de complemento a los sistemas GPS y GLONASS tradicionales, facilitando un posicionamiento global de uso civil y alta precisión (Salgado et ál., 2001). Una característica importante de este sistema es que permitirá estimar la posición en tiempo real con una garantía de disponibilidad del servicio en las circunstancias más extremas y que informará a sus usuarios de posibles problemas con sus satélites en cuestión de segundos (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008). Estas características serán de gran importancia para trabajos y aplicaciones donde la seguridad y calidad es vital, como en el caso del guiado de trenes y el aterrizaje de aviones.

El sistema se encuentra gestionado por la Agencia Espacial Europea ESA y nació como una iniciativa conjunta auspiciada por la Comisión Europea para ser el primer sistema de posicionamiento global enfocado a uso civil. Sus inicios entre 2000 y 2003 dieron paso a una fase de desarrollo y validación de órbitas (IOV) con el lanzamiento de dos satélites GIOVE-A y GIOVE-B en 2005 y 2008 (Moreno, 2012), estando actualmente en la fase de despliegue de la constelación con el lanzamiento de los cuatro primeros satélites en pruebas en 2012 (Figura 5.4). Se prevee que la fase operacional (FOC) se desarrolle en torno a 2015-2020, a pesar de los numerosos retrasos que ha sufrido el proyecto.

Una vez completa, la constelación consistirá en 30 satélites situados en tres órbitas a unos 23200 kilómetros de altitud sobre la superficie. La inclinación de cada plano orbital será de unos 56° respecto al Ecuador, eligiéndose este valor para que existiera una buena cobertura por encima de los 75° de latitud Norte. De este modo se consigue una visibilidad de unos 6-8 satélites por encima del horizonte en condiciones extremas.

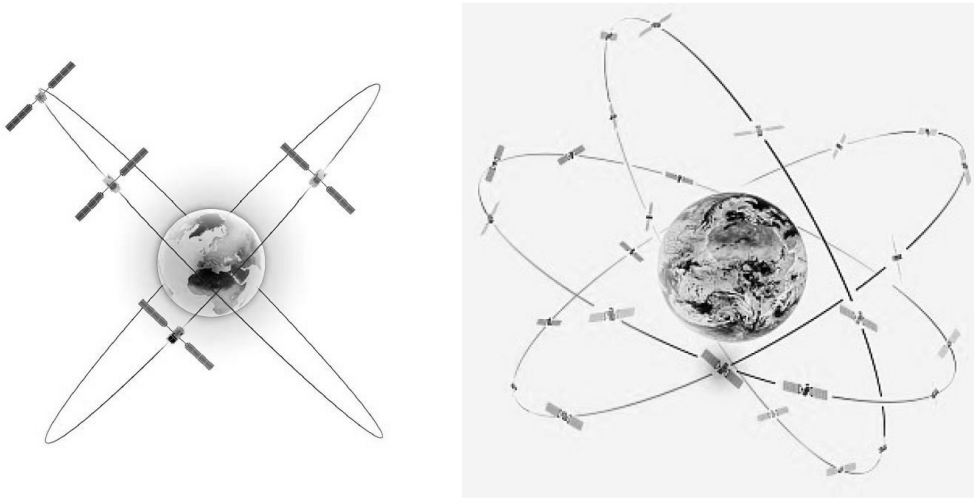


Figura 5.4: Primeros satélites operacionales Galileo y constelación completa. Fuente [www.giove.esa.int](http://www.giove.esa.int)

La infraestructura en tierra estará compuesta por dos centros de control (GCC); cinco estaciones de telemetría, seguimiento y control; 9 estaciones de banda-C conectadas alrededor del mundo y unas 40 Estaciones Sensoras Galileo (GCS) (Moreno, 2012). El proceso de comunicación será a partir de los datos facilitados por las GCS que serán enviados al GCC a partir de una red de conexión. El GCC utilizará estos datos para calcular la información integrada y para sincronizar los osciladores de todos los satélites con los relojes de las estaciones en tierra. El intercambio de información entre los centros de control y los satélites será establecido a partir de las estaciones de banda-C.

Una vez completamente operacional, el sistema Galileo prestará una serie de servicios al usuario (Tabla 5.1) que vienen descritos a continuación (Benedicto y Ludwig, 2001):

- **Servicio Abierto** (*Open Service (OS)*): Que no tendrá cargo al usuario y que permitirá obtener resultados de posicionamiento y tiempo junto a la interoperabilidad con GPS y GLONASS. Con este servicio se obtendrán posiciones en tiempo real con precisiones por debajo del metro.
- **Servicio para Aplicaciones Críticas** (*Safety of Life (SoL)*): Que mejorará las prestaciones del OS mediante mensajes de integridad con la máxima cobertura mundial. Este servicio se utilizará para las aplicaciones de transporte donde es necesario una mayor seguridad a la hora de estimar la posición, como es el caso de navegación terrestre y aerolíneas.
- **Servicio Comercial** (*Commercial Service (CS)*): Que tendrá un cargo al usuario pero aportará mayor precisión en el posicionamiento. Estará orien-

tado a aplicaciones de mercado donde las necesidades son mayores a las que facilita el OS. El servicio agregará dos señales protegidas mediante cifrado comercial que podrá ser desbloqueado mediante el pago de un canon.

- **Servicio Público Regulado** (*Public Regulated Service (PRS)*): Que dará servicio de posicionamiento y tiempo a usuarios concretos con necesidades específicas de continuidad como las fuerzas y cuerpos de seguridad del estado. Este servicio cuenta como característica principal la robustez, es un servicio independiente para uso gubernamental que seguirá funcionando en caso de interferencias intencionadas.
  
- **Servicio de Búsqueda y Salvamento** (*Search and Rescue Service (SAR)*): Que garantizará la recepción en casi tiempo real de mensajes de socorro, la localización precisa de alertas en pocos metros y una óptima disponibilidad de todo el segmento espacial. El objetivo principal de este servicio es facilitar las operaciones de rescate.

Servicio	Precisión	Disponibilidad
Servicio abierto (OS)	h=4m / v=8m	99.8 %
Servicio para aplicaciones críticas (OS)	h/v=4-6m	99.8 %
Servicio Comercial (CS) (global)	h/v= >1m	99.8 %
Servicio Comercial (CS) (local)	h/v= >10cm	99.8 %
Servicio público regulado (PRS) (global)	h=6.5m / v=12m	99.9 %
Servicio público regulado (PRS) (local)	h/v=1m	99.9 %

Tabla 5.1: Servicios disponibles para el sistema Galileo. La precisión está definida en horizontal (h) y vertical (v) en centímetros. La disponibilidad se refiere a la cobertura con la constelación completamente operativa. Fuente [Butsch \(2007\)](#)

En el diseño de la señal de Galileo se tuvo en cuenta la adquisición, características de seguimiento, interrelación con otros sistemas GNSS, resistencia contra las interferencias y reducción de la componente multipath. El sistema emitirá en 3 frecuencias dentro de la banda L (E1, E5 y E6) que serán diferenciadas por la técnica CDMA. En total, Galileo contará con 10 señales E1A, E1B, E1C, E6A, E6B, E6C, E5a-I, E5a-Q, E5b-I y E5b-Q que serán transmitidas para proveer de los diferentes servicios descritos con anterioridad.

El OS emitirá en 3 señales denominadas E1BC, E5a y E5b, las secuencias E1B y E1C serán moduladas por una portadora de tipo MBOC mientras que en el caso de E5a y E5b lo serán por AltBOC ([Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008](#)). Por razones de interrelación con el sistema GPS, la frecuencia portadora E5a coincidirá con la L5, E1 incluirá la frecuencia L1 y dos bandas adyacentes y el código civil C modulado sobre la E1 será similar a la futura señal L1C de GPS.

### 5.1.4. El Sistema BeiDou-2/COMPASS

El Sistema de Navegación Compass (CNSS), también llamado BeiDou-2, es la alternativa china a los sistemas de posicionamiento global tradicionales GPS, GLONASS y Galileo. Desarrollado por la Academia China de Tecnología Espacial [www.beidou.gov.cn](http://www.beidou.gov.cn), sus inicios fueron en el ámbito militar (Chong, 2009) con las primeras misiones Beidou-1 que utilizaba satélites geostacionarios con un enfoque de posicionamiento regional.

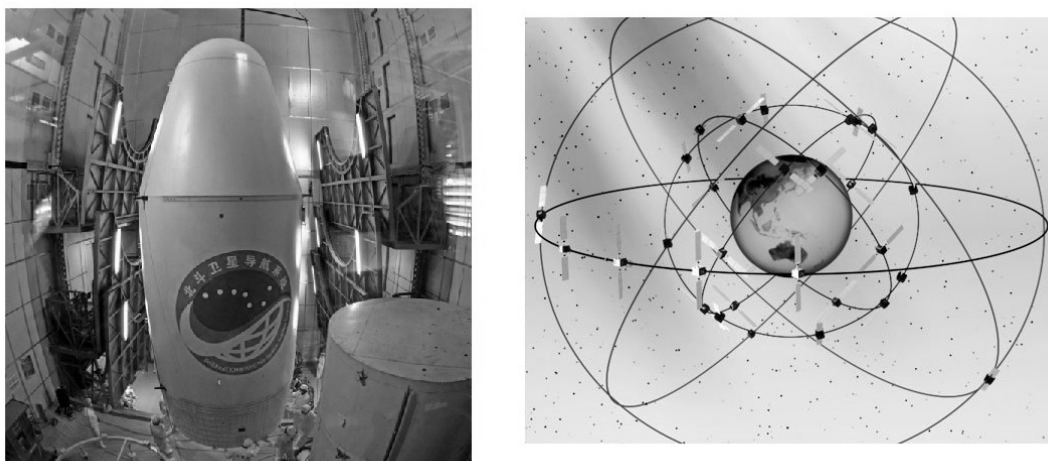


Figura 5.5: Preparación de satélite del sistema BeiDou/COMPASS para lanzamiento (izquierda) y constelación completa (derecha). Fuente <http://en.beidou.gov.cn/>

Los 3 primeros satélites experimentales BeiDou-1 (1A, 1B y 2A) fueron lanzados entre 2000 y 2003 (Van-Haafte, 2007), siendo disponibles para uso civil desde 2004. A partir de 2005, la nueva constelación BeiDou-2 comenzó a desarrollarse con el lanzamiento del primer satélite de la segunda generación en abril de 2007 y 2009, a éste le siguieron 5 nuevos lanzamientos en 2010 (Barbosa, 2010) y 5 más durante 2012 (Tabla 5.2, lo que pone la constelación actualmente con un total de 15 satélites. Se prevé que el sistema esté completamente operacional en el año 2020 (Chong, 2009).

Una vez completa la constelación, BeiDou-2/COMPASS contará con un total de 35 satélites incluyendo 5 satélites geostacionarios, 27 de órbita media terrestre y 3 de órbita inclinada geosincrónica con una cobertura mundial (Figura 5.5). Las frecuencias de trabajo serán 3 (B1, B2 y B3), permitiendo un servicio abierto al usuario y el uso conjunto con los otros sistemas GNSS disponibles.

Ofrecerá además dos niveles de servicio, uno gratuito para usuarios civiles y otro licenciado para uso militar. El servicio libre tendrá una precisión de 10 metros

en navegación y sincronizará los relojes con una precisión de 50 nanosegundos mientras que el servicio bajo licencia permitirá una mayor precisión y facilitará información sobre el estado del sistema a los usuarios (Moreno, 2012).

Fecha	Lanzadera	Denominación	Órbita
14 abril 2007	LM-3A	M1	MEO 21500 km
15 abril 2009	LM-3C	G2	GEO 38° E
17 enero 2010	LM-3C	G1	GEO 144.5° E
2 junio 2010	LM-3C	G3	GEO 84° E
1 agosto 2010	LM-3A	IGSO1	IGSO 118° E
1 noviembre 2010	LM-3C	G4	GEO 160° E
18 diciembre 2010	LM-3A	IGSO2	IGSO 118° E
10 abril 2011	LM-3A	IGSO3	IGSO 118° E
26 julio 2011	LM-3A	IGSO4	IGSO 95° E
2 diciembre 2011	LM-3A	IGSO5	IGSO 95° E
24 febrero 2012	LM-3C	G5	GEO 59° E
29 abril 2012	LM-3B	M3/M4	MEO
18 septiembre 2012	LM-3B	M5/M6	MEO
25 octubre 2012	LM-3C	G6	GEO 80° E

Tabla 5.2: Lista de satélites BeiDou/COMPASS a 1 de enero de 2013. Se indica si el satélite es geoestacionario (GEO) o de órbita media (*Medium Earth Orbit*, MEO). Fuente <http://www.nasaspaceflight.com/>

## 5.2. Características del sistema GPS

### 5.2.1. Segmentos del Sistema GPS

El sistema GPS se puede dividir en tres segmentos diferenciados, por un lado el Segmento Espacial, donde se incluyen los satélites que transmiten las señales en dos frecuencias moduladas, el Segmento de Control, que consiste en estaciones en tierra para el seguimiento del sector espacial y actualización de las señales y el Segmento Usuario, formado por los receptores pasivos que captan la señal GPS de los satélites (Figura 5.6).

#### 5.2.1.1. El segmento espacial

Este segmento lo componen los 24 satélites de la constelación NAVSTAR/GPS distribuidos en seis planos orbitales. Los satélites, que cuentan con transmisores de radiofrecuencias, relojes atómicos, microprocesadores, propulsores y paneles

solares, describen órbitas cuasicirculares con una inclinación de  $55^\circ$ , un semieje mayor de 26000 kilómetros y un período de aproximadamente 12 horas.

Hasta la fecha los satélites GPS pertenecen según diseño a tres bloques diferenciados, I, II y III. Los primeros lanzados entre 1978-1985 son los del bloque I, que fueron sustituidos paulatinamente por el bloque II a partir de 1990. Estos últimos contaban con osciladores de rubidio y cesio (Van Melle, 1990). Posteriormente aparecieron los satélites de los bloques IIA, IIR, IIR-M y IIF, lanzados en las décadas 1990-2000, y con ciertas mejoras respecto al bloque II original: Un Máser de Hidrógeno que lograba más precisión que los osciladores de rubidio y cesio originales, una frecuencia civil L2C y una vida útil superior a los 10 años. Los más recientes pertenecen al bloque III, serán lanzados a partir de 2014 y contarán con una vida útil de hasta 15 años.

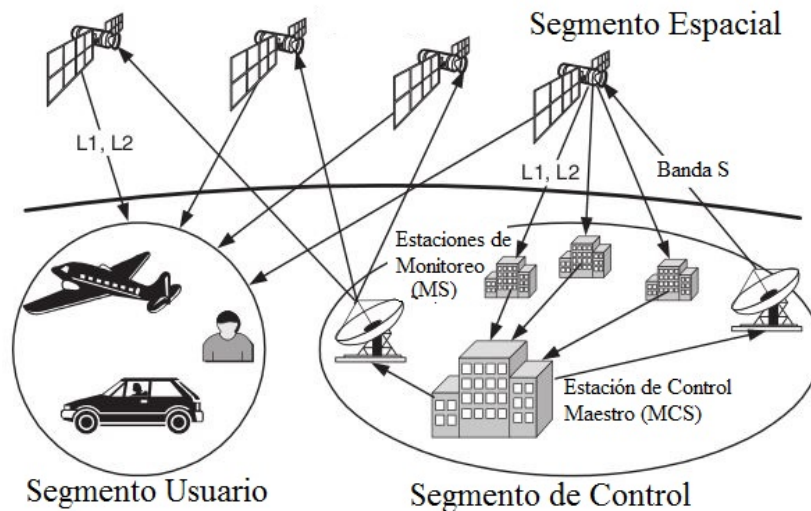


Figura 5.6: Segmentos del Sistema GPS con la relación existente entre ellos. Fuente <http://www.wireless-earth.de/>

El tiempo es una variable de suma importancia en la determinación de la posición con GPS, es por ello que la calidad del reloj del satélite y el mantenimiento del mismo son esenciales para un correcto funcionamiento del sistema. En los primeros satélites se utilizaban osciladores de cuarzo que fueron sustituidos posteriormente por osciladores de rubidio y cesio para incrementar la precisión. La escala de tiempo es una característica propia del GPS (Langley, 1999), su origen está fijado a las 0h UTC del 6 de enero de 1980. En ese instante el TAI estaba 19 segundos por delante del UTC, y por lo tanto también del GPS, por otra parte, el retraso de UTC respecto al tiempo GPS, originalmente nulo, se ha ido incrementando también por los *lap seconds* hasta llegar a los 16 segundos (Seeber, 2003).

Actualmente los satélites GPS emiten señales en dos frecuencias distintas denominadas L1 y L2 estando una tercera L5 en fase de introducción siendo emitida

por los satélites del bloque IIR-M. Estas tres frecuencias L1, L2 y L5 se obtienen a partir de una frecuencia fundamental  $f_o = 10,23$  MHz generada a partir de los osciladores a bordo de cada satélite y multiplicada por 154, 120 y 115 respectivamente. De este modo las frecuencias quedarían  $L1 = 1575,42$  MHz,  $L2 = 1227,60$  MHz y  $L5 = 1176,45$  MHz con una longitud de onda de 19,05, 24,42 y 23,43 centímetros (Figura 5.7). Todas estas señales están moduladas además por dos códigos binarios que aportan un ruido pseudoaleatorio característico.

Sobre estas ondas portadoras se envía información como señales moduladoras, dos códigos y un mensaje (Misra y Enge, 2001). El código C/A es emitido con una frecuencia  $\frac{f_o}{10} = 1023$  MHz repitiéndose cada milisegundo indistintamente para cada satélite. Por otro lado, el código Preciso (P), con una frecuencia  $f_o = 10,23$  MHz se repite al cabo de 267 días. Una característica del código P es que es individual para cada satélite y se inicia una vez por semana a las 0h de cada domingo (inicio de la semana GPS). En ambas portadoras L1 y L2 se modula el código C/A y el mensaje, sobre la L2 se modula solo el código P militar con la introducción en la actualidad del código L2C (civil) emitida por el bloque IIR-M. La portadora L5 por su parte cuenta con dos códigos denominados I5 y Q5.

Los códigos C/A y P son generados por un sistema llamado *Tapped Feedback Shift Registers* y permiten determinar la distancia entre el satélite y el receptor a partir del tiempo de llegada de la señal. Este tiempo se obtiene comparando la estructura adquirida por el receptor del correspondiente código del satélite con una réplica generada por el mismo receptor (Seeber, 2003). El cálculo de la distancia por esta metodología es la base del posicionamiento por código que permite una precisión de 10-15 metros.

Además de por los códigos C/A y P, las frecuencias están moduladas por el mensaje de navegación que es emitido por los satélites a 50 bps durante 30 segundos. El mensaje de navegación está dividido en 5 subestructuras y proporciona información importante para el usuario como son las efemérides predichas para los satélites, las efemérides emitidas, correcciones para el efecto atmosféricos en la propagación de la señal, error de reloj y el estado de funcionamiento del satélite (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008). La longitud del mensaje es de 300 bits (6 segundos) iniciándose con una palabra telemétrica TLM e incluye la palabra clave HOW para pasar del código C/A al P.

A partir de 1983, el Departamento de Defensa de Estados Unidos desclasificó parcialmente el sistema GPS pero mantiene un control sobre el sistema en caso de conflicto armado o amenaza sobre Estados Unidos. Existen dos métodos posibles para manipular la señal, por un lado la ya comentada Disponibilidad Selectiva, que degrada deliberadamente la estabilidad de los relojes atómicos del satélite introduciendo errores en la señal emitida por los satélites y, por otro, con el método *Anti-Spoofing*, que produce una encriptación del código P transmitido en la L2. Este código denominado Y o P encriptado sólo es accesible por el Departamento de Defensa de Estados Unidos y sus aliados militares.

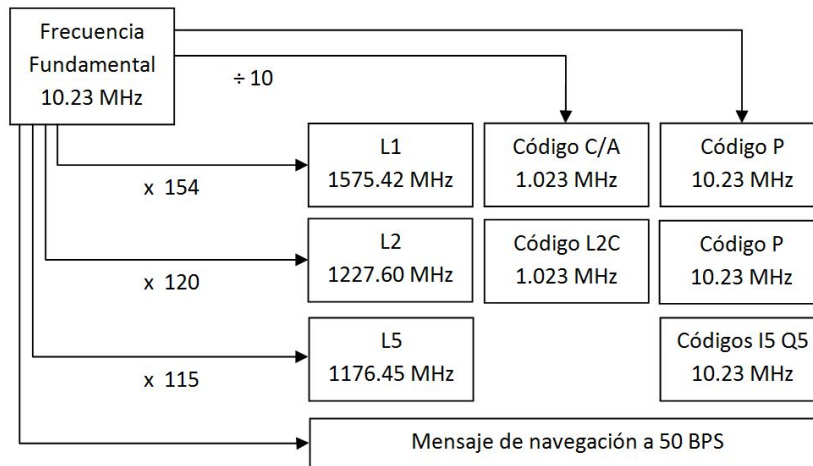


Figura 5.7: Distribución de frecuencias GPS a partir de la frecuencia fundamental, con los códigos y el mensaje de navegación. Fuente Berrocoso et ál. (2004)

### 5.2.1.2. El segmento de control

El segmento de control es responsable del correcto funcionamiento y operatividad del Sistema GPS. Está formado por la estación principal de control (MCS) de Colorado Springs y otras 4 situadas en las Islas Hawaii (Océano Pacífico), Isla Ascensión (Atlántico Sur), Isla Diego García (Océano Índico) y Atolón de Kwajalein (Islas Marshall, Océano Pacífico) (Misra y Enge, 2001) (Figura 5.8). La razón de esta dispersión en las estaciones de control se debe a que es necesario que tengan una comunicación continua con la constelación de satélites.

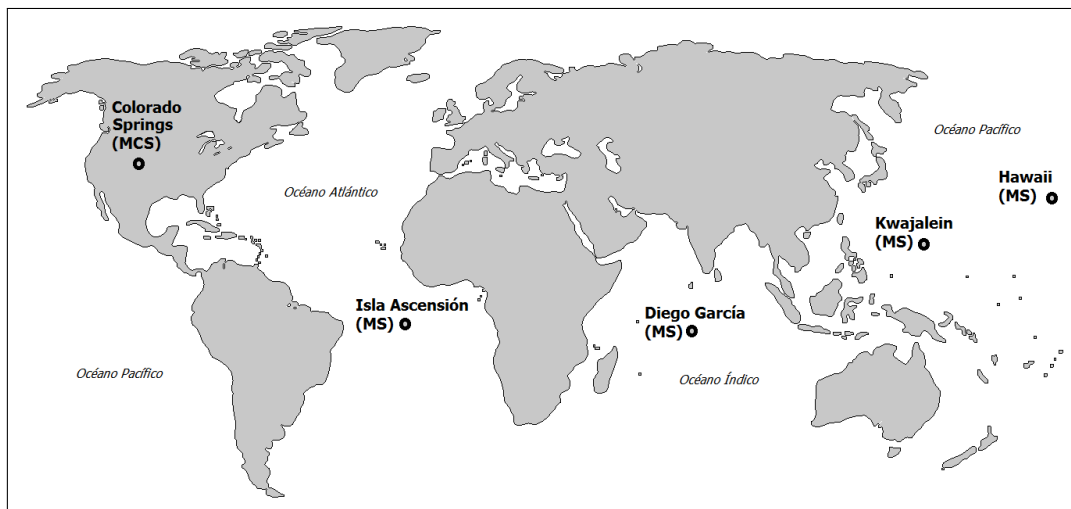


Figura 5.8: Segmento de Control GPS con la situación de las estaciones de control. MS: Estación de control, MCS: Estación de control principal

El principal objetivo de estas cinco estaciones es realizar un seguimiento de los satélites GPS, controlar sus órbitas, predecir las efemérides y comprobar el estado del reloj. Esto es posible gracias a que las posiciones geodésicas de estas estaciones son conocidas con un elevado grado de precisión por el uso de técnicas astronómicas como es el caso de la VLBI. Otras labores que hace específicamente la MCS es la gestión de maniobras orbitales de ajuste, ya que es la responsable de la correcta posición de los satélites en sus órbitas, así como de la sustitución de aquellos que han concluido su vida útil.

El proceso que siguen las estaciones de control es el siguiente: En primer lugar reciben de manera continua las señales de todos los satélites que se encuentren por encima de su horizonte, incluyendo datos meteorológicos para evaluar los modelos de corrección troposféricos e ionosféricos. Posteriormente, todos esos datos son enviados a la MCS donde se realizan los cálculos de las posiciones precisas de los satélites, del estado de los relojes y la generación de modelos. Finalmente la MCS envía la información al resto de estaciones de control que transmiten las nuevas efemérides y correcciones a través de sus antenas terrestres.

En un principio las comunicaciones se realizaban cada ocho horas para posteriormente pasar a una descarga de información una o dos veces al día. Estos datos transmitidos a los satélites es lo que llega a los usuarios por el mensaje de navegación. El mantenimiento del segmento espacial (posición y parámetros orbitales) a través de las estaciones de control es básico en el sistema GPS, ya que la determinación de posiciones depende de la corrección y precisión de esta información.

Además de estas estaciones, en los orígenes del sistema existían otras redes externas que hacían seguimiento aunque no disponían de control explícito sobre los satélites GPS, este era el caso de la red CIGNET (Chin, 1992), diseñada para efectuar observaciones y elaborar efemérides de precisión que se utilizarían posteriormente en aplicaciones geodésicas y geodinámicas. Las estaciones de esta red tenían la característica de estar situadas en las proximidades de las estaciones VLBI.

### **5.2.1.3. El segmento usuario**

Este segmento lo compone la instrumentación que utiliza el usuario para recibir la señal GPS así como para el tratamiento y configuración de la misma (Seeber, 2003). Los elementos principales de este segmento son el equipo de observación, compuesto de antena y receptor, y el software de gestión de datos. Debido a la diversidad de aplicaciones que tiene el sistema GPS, el diseño de los equipos será diferente y adaptado a cada necesidad, ya sea por la integración de los elementos o la calidad de los mismos.

Un equipo GPS genérico está compuesto por una antena, un procesador interno que genera las réplicas de los códigos P y C/A, un oscilador de precisión que marca el patrón de tiempo del receptor, una unidad de almacenamiento para guardar las observaciones, una unidad de control y unos elementos auxiliares, como son los cables de conexionado entre las diferentes partes que lo integran.

La antena convierte en corriente eléctrica la radiación electromagnética que recibe de los satélites GPS. Para una correcta captación de la señal, las antenas suelen contar con elementos que permitan amplificar la débil señal que llega hasta ellas, para así enviarla con la suficiente potencia al receptor a través de los cables. También cuentan con otros elementos que evitan la recepción de señales rebotadas (Efecto Multipath) desde el suelo u objetos cercanos (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008). Una correcta calibración de la antena es importante, ya que esta información permite depurar la señal según el ángulo de incidencia y la posición del centro de fase.

El aparato receptor es el instrumento que almacena y gestiona la señal GPS. Usualmente las marcas comerciales de estos equipos (LEICA, TRIMBLE, TOPCON, entre otros) llevan implementados de fábrica un software propietario que permite programar las observaciones y generar los ficheros RINEX de datos que serán luego descargados por los usuarios.

### 5.3. Ecuaciones de observación GPS

Para el planteamiento de las ecuaciones del modelo numérico, se establecen los observables que pueden ser planteados con la señal GPS. Por un lado se tendrían las observaciones de pseudodistancia, basadas en el mensaje de código PRN que está modulado en la onda portadora, las observaciones de fase, centradas en la parte fraccional de la fase portadora y las longitudes de onda completas desde un tiempo de referencia  $t_o$  y las observaciones Doppler, que representan la diferencia entre las frecuencias nominales y las recibidas entre 2 épocas de observación.

En este trabajo solo se tratarán las ecuaciones derivadas de las observaciones de pseudodistancia y de fase según lo descrito en Berrocoso et ál. (2004) con ampliaciones provenientes de Leick (2004) y Hoffmann-Wellenhof et ál. (2001). En función de las combinaciones de las ecuaciones de observación se tendrán los distintos tipos de posicionamiento GPS diferencial y no diferencial que se desarrollarán en los siguientes capítulos de esta tesis doctoral.

#### 5.3.1. Ecuación de observación de la pseudodistancia

La pseudodistancia es la medida de la distancia entre el satélite y el receptor en la época de transmisión y recepción de la señal. Para este cálculo es impor-

tante la obtención del tiempo que tarda la señal en llegar al receptor para luego multiplicarlo por la velocidad de la luz, este tiempo se determina con la alineación del código PRN de la señal con el generado por el receptor maximizando la correlación.

Se denomina pseudodistancia porque no es la distancia geométrica real entre satélite y receptor, ya que este cálculo de medida viene ya con errores intrínsecos: Estado del reloj del satélite y del receptor, una trayectoria de la señal que no es rectilínea y los retardos troposféricos e ionosféricos. Para el cálculo se puede utilizar el código C/A, que da una precisión de 3 metros, o el código P, que llega hasta los 30 centímetros.

En el modelo matemático de la pseudodistancia habrá que tener en cuenta dos momentos, el instante de emisión de la señal desde el satélite  $\tau_a$  y el momento de recepción por parte del receptor  $\tau_b$ . Ambos instantes referidos a la escala de tiempo GPS. Puesto que estos instantes se miden con relojes situados en el satélite y en el receptor, lo que realmente se mide es el instante de emisión, en la escala de tiempo del satélite  $t(\tau_a)$  y el instante de recepción, en la escala de tiempo del receptor  $T(\tau_b)$  (Figura 5.9).

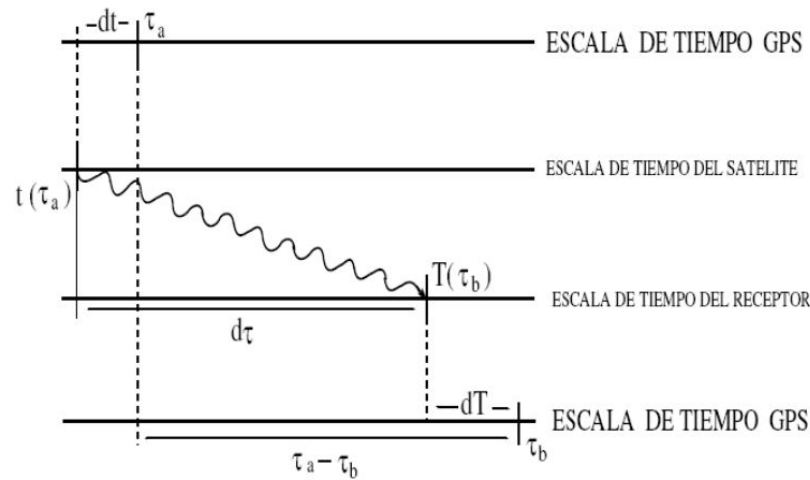


Figura 5.9: Representación de la escala de tiempo GPS en base a la correspondiente en el satélite y en el receptor. Fuente Berrocoso et ál. (2004)

Además como ambos relojes están afectados por degradaciones inevitables en los osciladores, es importante modelizar estos errores con unos retardos  $dt_\tau$  y  $dT_\tau$  en tiempo GPS. Por tanto, las ecuaciones donde se calcula el instante de emisión y recepción de la señal, en la escala de tiempo GPS  $\tau_a$  y  $\tau_b$ , quedarían:

$$\tau_a = t(\tau_a) + dt_\tau \quad \tau_b = T(\tau_b) + dT_\tau \quad (5.2)$$

y despejando  $t(\tau_a)$  y  $T(\tau_b)$  que serían las observaciones a tener en cuenta, quedaría como sigue:

$$t(\tau_a) = \tau_a - dt_\tau \quad T(\tau_b) = \tau_b - dT_\tau \quad (5.3)$$

Considerando que los errores de los relojes son una variable que puede tomar cualquier signo, se considerarían como un valor  $dt$  y  $dT$  que se añaden al instante de emisión y recepción de la señal en la escala GPS respectivamente:

$$t(\tau_a) = \tau_a + dt \quad T(\tau_b) = \tau_b + dT \quad (5.4)$$

El tiempo medido entre la emisión de la señal desde el satélite hasta la recepción ( $d\tau$ ) sería la resta de los tiempos definidos en las ecuaciones (5.3) y (5.4). La ecuación de observación de la pseudodistancia sería entonces:

$$d\tau = T(\tau_b) - t(\tau_a) \quad (5.5)$$

$$d\tau = (\tau_b + dT) - (\tau_a + dt) \quad (5.6)$$

$$d\tau = \tau_b - \tau_a + dT - dt \quad (5.7)$$

Otros efectos a tener en cuenta y que afectan a la pseudodistancia serían el retardo que produce el hecho de que la señal atraviese la atmósfera  $dt_{atm}$ , los debidos a la presencia de cuerpos reflectantes en las proximidades de la estación receptora  $dt_{reflex}$  y los producidos por el recorrido de la señal desde el centro de la antena hasta el dispositivo  $dt_{recep}$ . Si se aplican todos estos retardos a la ecuación (5.7), quedaría:

$$d\tau = \tau_b - \tau_a + dT - dt + dt_{atm} + dt_{reflex} + dt_{recep} \quad (5.8)$$

Y agrupando  $dt_{reflex}$  y  $dt_{recep}$  en un retardo genérico de carácter aleatorio  $dt_{aleat}$ ,

$$d\tau = \tau_b - \tau_a + dT - dt + dt_{atm} + dt_{aleat} \quad (5.9)$$

Tras esto solo quedaría multiplicar por la velocidad de la luz en el vacío  $c = 299792458$  m/s para así tener la expresión de la distancia observada:

$$cd\tau = c(\tau_b - \tau_a) + c(dT - dt) + c dt_{atm} + c dt_{aleat} \quad (5.10)$$

Considerando  $p = cd\tau$ ,  $\rho = c(\tau_b - \tau_a)$  y  $d_{atm} = d_{ion} + d_{trop}$ , es decir, la unión de los retardos troposféricos e ionosféricos, el modelo funcional para la pseudodistancia quedaría de la siguiente forma:

$$p = \rho + c(dT - dt) + d_{trop} + d_{ion} + \epsilon_p \quad (5.11)$$

$p$	Observable de la pseudodistancia
$\rho$	Distancia geométrica real entre la estación y el satélite
$dt, dT$	Correcciones de las escalas de tiempo del satélite y del receptor respectivamente respecto a la escala de tiempo GPS
$d_{trop}$	Retardo troposférico sobre la distancia
$d_{ion}$	Retardo ionosférico sobre la distancia
$c$	Velocidad de la luz en el vacío
$\epsilon_p$	Ruido aleatorio del sistema

### 5.3.2. Ecuación de observación fase de la portadora

La medida de fase de la portadora viene de comparar la fase de la señal recibida por el receptor y la generada por el oscilador del mismo. Puesto que la frecuencia de la portadora es mayor en relación a los códigos emitidos, se puede alcanzar mayor precisión en la determinación de la distancia satélite-receptor que con el observable pseudodistancia. En la medida de la fase de la portadora aparece también una nueva incógnita denominada ambigüedad, que sería el número de ciclos emitidos por el satélite hasta que el receptor recibe la señal, sumando la parte fraccional de la fase quedaría el observable completo.

El problema de la distancia satélite-receptor estaría resuelto, teóricamente, multiplicando la fase total de la portadora por la correspondiente longitud de onda aunque siempre estaría la ambigüedad como incógnita a resolver para determinar las coordenadas del receptor.

Otro aspecto importante que afecta a la medida de fase es el efecto Doppler, asociado a que el satélite se encuentra en movimiento dentro de su órbita mientras está transmitiendo. Este efecto modifica la frecuencia de la portadora en contraposición con la frecuencia nominal emitida por el satélite, que se mantiene constante.

Para el modelo matemático de la fase de la portadora es importante tener en cuenta que la frecuencia  $f$  de la señal sería la variación de la fase de la señal  $\phi$  respecto al tiempo, y que se calcularía a partir de la derivada de la fase de la señal. Análogamente, la integral de la frecuencia daría la fase de la señal. Con esto se puede plantear la ecuación de ambas para un instante  $t_o$  determinado:

$$f(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}, \quad \phi(t) = \int_{t_o}^t f(\tau)d\tau + \phi(t_o) \quad (5.12)$$

donde  $\phi(t_o)$  es la fase inicial en ciclos de la señal en un determinado instante inicial  $t_o$ .

Para obtener el tiempo con la fase medida de un oscilador  $\Psi(t)$  basta considerar la diferencia de fase de la señal en dos instantes de tiempo  $t$  y  $t_o$  utilizando para ello la siguiente función:

$$\Psi(t) = \frac{\phi(t) - \phi(t_o)}{f_o} \quad (5.13)$$

Siendo  $f_o$  la frecuencia nominal del oscilador, no afectada por el efecto Doppler ni efectos relativistas de desplazamiento del satélite.

Considerando la frecuencia del oscilador constante e igual a la frecuencia nominal  $f_o$ , entonces la ecuación (5.12) quedaría:

$$\phi(t) - \phi(t_o) = \int_{t_o}^t f(\tau) d\tau = f_o(t - t_o) \quad (5.14)$$

Y sustituyendo en (5.13)

$$\Psi(t) = t - t_o \Rightarrow t = \Psi(t) + t_o \quad (5.15)$$

donde queda expresado el tiempo exacto de recepción de la señal  $t$  en la escala de tiempo GPS a partir de la fase medida  $\Psi(t)$  siendo  $t_o$  el instante inicial de emisión.

Si se considera que la frecuencia del oscilador no es constante, existiría una desviación  $\Delta f$  de la frecuencia emitida con respecto a la frecuencia nominal  $f_o$ . De este modo el cálculo del tiempo verdadero expresado en la fórmula (5.15) se vería modificado a partir de una nueva ecuación para la frecuencia:

$$f(t) = f_o + \Delta f(t) \quad (5.16)$$

Sustituyendo  $f(t)$  en (5.14), y teniendo en cuenta la expresión de la medida de la fase total definida en la ecuación (5.13), la fase medida  $\Psi(t)$  quedaría:

$$\Psi(t) = \frac{\phi(t) - \phi(t_o)}{f_o} = \frac{1}{f_o} \int_{t_o}^t f(\tau) d\tau = \frac{1}{f_o} \int_{t_o}^t (f_o + \Delta f(\tau)) d\tau \quad (5.17)$$

y desarrollando la integral

$$\Psi(t) = t - t_o + \int_{t_o}^t \frac{\Delta f(\tau)}{f_o} d\tau \quad (5.18)$$

Puesto que  $\Psi(t) = t - t_o$ , se puede considerar el incremento de la fase medida como desarrollo de la ecuación (5.18)

$$\Delta \Psi(t) = \int_{t_o}^t \frac{\Delta f(\tau)}{f_o} d\tau \quad (5.19)$$

Esto indica que la desviación de la frecuencia  $\Delta f(\tau)$  provoca una desviación en el tiempo medido  $\Delta\Psi(t)$ , lo que permite obtener finalmente una relación entre la escala de tiempo del oscilador y la escala de tiempo GPS. Añadiendo esta información a la ecuación (5.15).

$$\Psi(t) = t - t_o + \Delta\Psi(t) \tag{5.20}$$

De este modo se comprueba que el tiempo obtenido a partir de la medida de la fase de un oscilador  $\Psi(t)$  es igual a la suma del tiempo verdadero  $t$  menos el tiempo correspondiente al desfase inicial denominado  $t_o$ , a lo que se le suma un término correspondiente a la desviación de la frecuencia del oscilador con respecto a la frecuencia nominal del mismo  $\Delta\Psi(t)$ .

Si se agrupa  $t_o$  y  $\Delta\Psi(t)$  en un término genérico denominado error del oscilador  $d\Psi(t)$ , la medida de la fase quedaría con el siguiente formato:

$$\Psi(t) = t + d\Psi(t) \tag{5.21}$$

donde al igual que antes sus componentes serían la escala de tiempo GPS definida por la medida de la fase del oscilador  $\Psi(t)$ , el error del propio oscilador  $d\Psi(t)$  y la escala de tiempo exacta  $t$ .

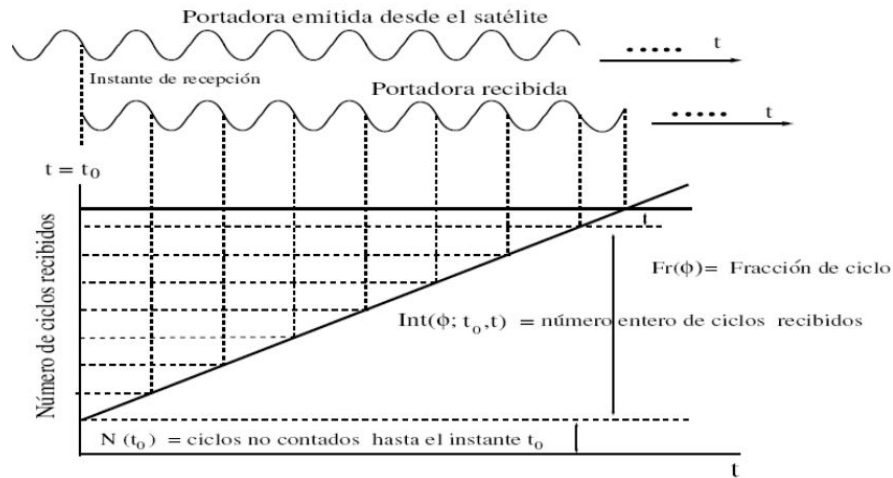


Figura 5.10: Representación del cálculo de ambigüedades GPS a partir de la fase emitida desde el satélite y la portadora recibida. Fuente Berrococo et ál. (2004)

Respecto a la fase total de la portadora, constaría por un lado de un número entero de ciclos  $Int(\phi, t_0, t)$  desde el instante en que se recibe la señal  $t_0$  hasta el instante  $t$ , una parte fraccional  $Fr(\phi)$  que hace referencia al instante de adquisición de la señal por el receptor, y un número entero de ciclos  $N(t_0)$ , correspondiente al intervalo de tiempo transcurrido desde que la señal fue emitida por el satélite hasta que se adquiere por el receptor (Figura 5.10). Este término

$N(t_o)$  es desconocido y se denomina ambigüedad inicial, siendo propio de cada satélite. Con estas consideraciones la fase total de la portadora sería:

$$\phi_{total} = Fr(\phi) + Int(\phi, t_o, t) + N(t_o) \quad (5.22)$$

Puesto que se desconoce el valor de la ambigüedad inicial, el observable *medida de la fase de la portadora*  $\phi_m$  no tendrá incluido este término, expresando la ecuación de la siguiente manera:

$$\phi_m = Fr(\phi) + Int(\phi, t_o, t) \quad (5.23)$$

La fase de la portadora observada  $\phi_{medida}$  se define como la diferencia entre la fase generada por el oscilador del receptor  $i$  en el instante de recepción de la señal, y la fase de la señal generada por el satélite  $k$  en el instante de transmisión, es decir,  $\phi_{medida} = \phi_i^k = \phi_i - \phi^k$ .

Teniendo en cuenta que en la diferencia de ambas fases en el instante de adquisición de la señal (fase comparada) solo aparecerá la parte fraccional de la fase, habrá que ir sumando el número entero de ciclos hasta que se produzca el cambio de frecuencia debido al movimiento del satélite (efecto Doppler)

$$\phi_{medida} = \phi_i(t) - \phi^k(t - \tau_i^k) \quad (5.24)$$

donde estarían definidos los siguientes términos:

$\phi_i$	Fase de la portadora generada en el receptor $i$ -ésimo en el instante $t$
$\phi^k$	Fase generada en el $k$ -ésimo satélite en el instante de transmisión $t - \tau_i^k$
$\tau_i^k$	Tiempo que tarda la señal en recorrer la distancia satélite-receptor

Para poder obtener las expresiones de  $\phi_i(t)$  y  $\phi^k(t - \tau_i^k)$  hay que tener en cuenta las ecuaciones (5.13) y (5.20)

$$\phi_i(t) = f_o t_i(t) + \phi_i(t_o) = f_o(t + dt_i(t)) + \phi_i(t_o) \quad (5.25)$$

$$\phi^k(t - \tau_i^k) = f_o(t - \tau_i^k + dt^k(t - \tau_i^k)) + \phi^k(t_o) \quad (5.26)$$

La diferencia de ambas dará la fase medida de la portadora y se puede tomar como un desarrollo de la ecuación (5.24)

$$\phi_i^k = f_o[\tau_i^k + dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + [\phi_i(t_o) - \phi^k(t_o)] \quad (5.27)$$

Para obtener la ecuación en unidades de longitud, basta multiplicar la ecuación (5.27) por la longitud de onda  $\lambda = \frac{c}{f_o}$  (Halliday et ál., 2001).

$$\lambda \phi_i^k = c\tau_i^k + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + \lambda[\phi_i(t_o) - \phi^k(t_o)] \quad (5.28)$$

Y de igual manera que pasaba con la observación de pseudodistancia, se pueden definir sus términos:

$c\tau_i^k$	Distancia recorrida por la señal desde el satélite al receptor
$c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)]$	Error de la distancia correspondiente a los osciladores del receptor y del satélite
$\lambda[\phi_i(t_o) - \phi^k(t_o)]$	Distancia que corresponde a la fracción de fase medida en el instante de recepción de la señal

$c\tau_i^k$  es una distancia calculada a partir de los tiempos registrados por los osciladores del satélite y del receptor, esta distancia también se ve afectada por los retardos que aplica la ionosfera ( $d_{ion}$ ) y la troposfera ( $d_{trop}$ ) a la señal cuando ésta atraviesa las capas de la atmósfera. De este modo se puede hacer la siguiente consideración a la distancia recorrida por la señal

$$c\tau_i^k = \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) - d_{ion} + d_{trop} \quad (5.29)$$

y sustituyendo en (5.28)

$$\lambda\phi_i^k = \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) - d_{ion} + d_{trop} + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + \lambda[\phi_i(t_o) - \phi^k(t_o)] \quad (5.30)$$

Consecuentemente, la ecuación de observación para la fase total de la portadora vendría al añadir la ambigüedad inicial  $N$  a la ecuación (5.30)

$$\Phi_i^k(t) = \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) - d_{ion} + d_{trop} + c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] + \lambda[\phi_i(t_o) - \phi^k(t_o)] + \lambda N_i^k \quad (5.31)$$

Y realizando una serie de modificaciones para simplificar la expresión (5.31)

$$\Phi = \Phi_i^k(t) \quad \rho = \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) \quad (5.32)$$

$$c(dT - dt) = c[dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)] \quad (5.33)$$

Quedaría la ecuación de observación de la fase total definitiva:

$$\Phi = \rho + c(dT - dt) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \epsilon_\Phi \quad (5.34)$$

$\Phi$	Observable de la fase de la portadora
$\rho$	Distancia geométrica real entre la estación y el satélite
$dt, dT$	Correcciones de las escalas de tiempo del satélite y del receptor respectivamente respecto a la escala de tiempo GPS
$d_{trop}$	Retardo troposférico sobre la distancia
$d_{ion}$	Retardo ionosférico sobre la distancia
$c, \lambda$	Velocidad de la luz en el vacío y longitud de onda de la fase
$N$	número entero de ciclos (Ambigüedad inicial)
$\epsilon_\Phi$	Ruido aleatorio del sistema debido al carácter experimental de las observaciones (errores en las efemérides, reflexión de la señal o propagación interna)

## 5.4. Elementos que afectan a las medidas GPS

### 5.4.1. Atmósfera

La señal GPS debe atravesar la atmósfera terrestre como paso previo para poder ser adquirida por el receptor. Puesto que se trata de un medio con características diferentes al vacío, es necesario tenerla en cuenta ya que afecta tanto a las medidas de fase como a las de pseudodistancia. El hecho principal es la refracción y dispersión que produce sobre la señal, variando el tiempo de propagación y modificando por tanto la distancia calculada.

Este efecto de dispersión es diferente si se trata de una onda particular o de un grupo de ellas, la relación de ambas velocidades vendría dada por la ecuación de Rayleigh ([Metheley, 1986](#)). Es importante tener en cuenta que la velocidad de fase es la velocidad con la que se propaga la portadora  $v_f = f\lambda$  y que la velocidad de grupo es la velocidad con la que se desplaza la información que contiene la portadora (códigos y mensaje de navegación)  $v_g = -\lambda^2 \frac{d_f}{d\lambda}$ .

Dentro de los efectos que produce la atmósfera hay que diferenciar dos capas con comportamientos distintos sobre la señal GPS, la troposfera y la ionosfera.

#### 5.4.1.1. Troposfera

La troposfera es la capa atmosférica que va desde la superficie hasta unos 15 kilómetros de altitud y que posee un grosor variable dependiendo de las condiciones atmosféricas y la topografía, en ella se producen los fenómenos meteorológicos y presenta una mayor concentración del vapor de agua. Su característica principal, a efectos de la señal, es la ausencia de iones libres. Es por ello que se trata de un medio no dispersivo para las señales electromagnéticas de frecuencias en torno a los 15 GHz ([Baueršima, 1982](#)) que además hace que la propagación de la señal no dependa de la frecuencia de emisión.

La refracción troposférica produce un retardo en el tiempo de llegada de la señal y depende básicamente de la distancia cenital de la misma, de la altitud de la estación y de la concentración de gases y vapor de agua ([Amir y Musa, 2009](#)). Este efecto tiene un valor mínimo en la dirección del cénit de la estación pero va aumentando progresivamente hacia el horizonte. Este retraso troposférico afecta a ambos observables, pseudodistancia y fase, y puede dividirse como una función del *Zenith Path Delay* ZPD con una componente seca, causada por los gases atmosféricos de nitrógeno y oxígeno, y otra húmeda, afectada por el vapor de agua ([Bevis et ál., 1992](#)).

Puesto que este retardo tiene una gran magnitud debe ser considerado necesariamente a la hora de trabajar con las medidas GPS, corrigiendo su efecto y considerando medidas directas de presión y temperatura para ser modelizado. El error que causa tiene unos valores en distancias calculadas que van de 1,9 a 2,5 metros y, en función del ángulo cenital, puede llegar a ser de 20 a 28 metros cerca del horizonte. Sin embargo, los modelos troposféricos planteados pueden corregir esta desviación hasta dejarla en magnitudes centimétricas.

Para el modelo matemático, se podrá considerar la troposfera dividida en dos capas ideales, una de aire seco y otra de vapor de agua (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2001). La contribución sobre la refracción total de la capa de aire seco es del 90 %, siendo más estable y, por tanto, más fácil de modelizar. En el caso del vapor de agua la contribución es cuantitativamente menor y además, puesto que la humedad varía espacial y temporalmente, la modelización resulta más compleja que en el caso de la componente seca.

Para un mejor ajuste los modelos troposféricos pueden utilizar los valores de una atmósfera estandar, donde la temperatura toma un valor de 291.16 grados Kelvin; la presión 1013.25 milibares y la humedad un 50 %, o considerar un modelo MOPS de la comisión RTCA, que provee de información de la troposfera a partir de posiciones estimadas de receptores, elevación de satélites y día del año (Moreno, 2012). Aunque tanto la atmósfera estandar como el MOPS modelizan a nivel del mar, es posible aplicar una corrección para considerar una altura determinada de la estación.

De cualquier modo, los mejores modelos troposféricos son aquellos que combinan datos meteorológicos directos medidos en la superficie y a diferentes alturas, con radiosondas y datos radiométricos, de este modo se ajustará en mayor medida a la realidad.

### Modelo Hopfield

Este modelo descrito en Hopfield (1969) utiliza las siguientes fórmulas para dimensionar la refractividad con unos coeficientes adecuados si se trata de la parte húmeda o seca. Respecto a la parte seca, se tendrían los siguientes:

$$N_{sec}^{trop}(h) = N_{sec,0}^{trop} \left[ \frac{h_{sec} - h}{h_{sec}} \right]^4 \quad (5.35)$$

$$h_{sec} = 40136 + 148,72 (T - 273,16) \quad N_{sec,0}^{trop} = \frac{c_1 p}{T} \quad (5.36)$$

Mientras que para la parte húmeda,

$$N_{hum}^{trop}(h) = N_{hum,0}^{trop} \left[ \frac{h_{hum} - h}{h_{hum}} \right]^4 \quad (5.37)$$

$$h_{hum} = 11000 \quad N_{hum,0}^{trop} = c_2 \frac{e}{T} + c_3 \frac{e}{T^2} \quad (5.38)$$

siendo  $N_{sec}^{trop}(h)$  y  $N_{hum}^{trop}(h)$  la refractividad de la parte seca y húmeda respectivamente,  $T$  la temperatura en grados Kelvin,  $p$  la presión atmosférica,  $e$  la presión relativa del vapor de agua en milibares,  $h$  la altura sobre la superficie terrestre y los coeficientes  $c_1 = 77,64^\circ K/Mb$ ,  $c_2 = -12,96^\circ K/Mb$  y  $c_3 = 3,718 \cdot 10^5 K^2/Mb$ .

Este modelo no tiene en cuenta la curvatura de la trayectoria de la señal, que pasaría como ruido en el modelo, pero considera que la presión y temperatura van en función de la posición del lugar de observación. Una modificación de este modelo viene expresada en [Seeber \(2003\)](#), quien reformula el modelo teniendo en cuenta el ángulo de elevación del satélite en el instante de observación.

### Modelo Hopfield Modificado

Este modelo reescribe la función empírica de Hopfield en función de los módulos de los vectores de posición en lugar de las alturas  $h$  de la superficie terrestre ([Hopfield, 1972](#)). Esta consideración se tendrá en cuenta tanto para la parte húmeda como para la seca a partir de una integral numérica que va en función del radio de la Tierra  $R$  y el ángulo de incidencia de la señal  $z$ .

Dependiendo de la resolución de esta integral saldrán varios modelos como el planteado en [Goad y Goodman \(1974\)](#), donde se considera un ángulo de elevación del tipo  $E = 90 - z$ .

### Modelo Saastamonien

Otro modelo muy utilizado para la corrección del efecto troposférico es el de Saastamonien, definido en [Saastamonien \(1973\)](#) y que se basa en las leyes asociadas a un gas ideal. La fórmula a aplicar sería la siguiente:

$$\Delta\rho^{trop} = \frac{0,002277}{\cos z} \left[ p + \left( \frac{1255}{T} + 0,05 \right) \epsilon - \tan^2 z \right] \quad (5.39)$$

En este modelo participa la distancia cenital observada  $z$ , la presión atmosférica  $p$  en milibares, la temperatura  $T$  en grados Kelvin y la presión relativa del vapor de agua  $\epsilon$  en milibares.

### Niell Mapping Function

Análogamente a los modelos descritos, se puede utilizar también una función de cartografiado de la troposfera (*Troposphere mapping function*) para conseguir

un correcto ajuste del efecto troposférico. Comúnmente se utiliza la función de Niell (*Niell Mapping Function*, NMF) en el análisis de datos GPS (Niell, 1996). Esta función, al igual que los modelos anteriores, divide la troposfera en una componente seca o hidrostática y otra húmeda.

Marini (1972) demostró en 1972 que la dependencia en el ángulo de elevación de una atmósfera horizontalmente estratificada podría ser aproximada a una fracción continua en términos de  $\frac{1}{\sin(E)}$ , siendo  $E$  el ángulo de elevación geométrica. De este modo se tendría la función  $m(E)$  con una serie de coeficientes que involucran la temperatura, presión y humedad relativa.

Esta función NMF (Niell, 1996) contiene los retardos de atmósfera hidrostática y húmeda basados en la formulación descrita en Marini (1972). La componente hidrostática de esta función de cartografiado está relacionada con la altura geopotencial del nivel de 200 milibares y las variables que participan son la latitud y altura sobre el nivel del mar y el día del año. La componente húmeda, por su parte, se calcula a partir de la refractividad húmeda vertical en el lugar de observación y tiene como variable de entrada la latitud.

#### **5.4.1.2. Ionosfera**

La ionosfera es una capa de la atmósfera que va de los 50 a los 2000 kilómetros de altura sobre la superficie terrestre y que tiene un contenido electrónico e iónico suficiente como para producir dispersiones en una señal electromagnética (Hargreaves, 1992).

Tal como se puede observar en la figura 5.12, la ionosfera se puede dividir en diferentes capas dependiendo de sus características. Las capas más bajas reciben los nombres de D y E y se generan durante el día debido a la radiación solar, desapareciendo posteriormente durante la noche (McNamara, 1991); se extienden desde los 50 a los 160 kilómetros dependiendo de la radiación incidente. La capa F se encuentra por encima de los 160-200 kilómetros y se divide a su vez en dos subcapas, F1 y F2. La mayor concentración electrónica se localiza en F2 y va decreciendo hacia arriba hasta llegar a una zona de transición que, como mínimo, alcanza los 500 kilómetros durante la noche y 800 durante el día. Sobre los 1100 kilómetros de media, la baja ionización presente prácticamente no tiene influencia en las señales electromagnéticas.

La ionosfera tiene un efecto diferente sobre la onda portadora y modulada de la señal GPS. El efecto produce un adelanto en la fase de la portadora, midiéndose distancias más cortas en medidas de fase, y un retraso en los códigos que modulan la señal, calculándose distancias más largas en pseudodistancia. En este sentido, este efecto provoca variaciones en las velocidades de grupo y de fase de la señal modulada y, por tanto, en el índice de refracción tanto del grupo como de la

fase. Esto es debido a que los electrones libres ionizados causan reflexiones y refracciones dependiendo de la frecuencia y del ángulo de llegada de la señal (Jakowski et ál., 2008).

Los niveles de ionización son cuantificados por el Contenido Total de Electrones (*Total Electron Content*, TEC), expresados como el número total de electrones presentes en una columna de  $1 \text{ m}^2$  sobre la línea directa de dos puntos,

$$TEC = \int N_e ds_o \quad (5.40)$$

donde  $N_e$  denota el número de electrones por  $\text{m}^3$  mientras que  $s_o$  es la distancia medida.

Las unidades en las que se expresa el TEC son *electrones/m<sup>2</sup>*, siendo una unidad de contenido electrónico (TECU) igual a  $10^{16}$  *electrones/m<sup>2</sup>*. La magnitud del retardo de grupo y el avance de fase de las señales GPS, denominado  $J$ , depende de la frecuencia y es proporcional al TEC en la dirección de propagación de la señal.

$$J = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad (5.41)$$

El efecto ionosférico tiene un gran repercusión en la transmisión de la señal GNSS, siendo esto una de las principales razones por la que los sistemas comenzaron a transmitir en dos frecuencias simultáneamente. Su efecto varía sustancialmente si la observación se hace de día o de noche, según la situación en el ciclo de actividad solar de 11 años (Hathaway et ál., 1994) (Figura 5.11), por la existencia de tormentas geomagnéticas, por la latitud de observación y según el ángulo de incidencia de la señal. En ocasiones, puede llegar a producir una variación en pseudodistancia de hasta 100 metros o más en períodos de intensa actividad solar o en satélites con una baja elevación.

La distribución del TEC en ocasiones no es homogénea. Asociado al efecto ionosférico está el de centelleo (*Ionospheric scintillation*) que tiene lugar cuando aparecen irregularidades a diferentes escalas en la distribución del contenido electrónico en la ionosfera (Basu et ál., 1986). Se caracteriza por una rápida fluctuación y descenso de la intensidad de la señal en el receptor, un aumento de los saltos de ciclo y, en ocasiones, por una pérdida total de la señal en el receptor. En este caso las medidas de fase se ven más afectadas que las de pseudodistancias (Dubey et ál., 2005). Este efecto es particularmente intenso en latitudes magnéticas bajas, justo después del ocaso y en torno a los equinoccios, cuando el campo magnético terrestre está más expuesto.

Para calcular el TEC existen varias maneras de actuar dependiendo de si el receptor utilizado es bifrecuencia o no. En el caso de que tenga la capacidad de recibir dos frecuencias es usual utilizar combinaciones lineales para contrarrestar

este efecto ionosférico (combinación libre-ionosfera). Cuando los receptores son monofrecuencia, es posible aplicar un modelo, como el de Klobuchar o NeQuick, a partir de unos coeficientes para generar la corrección. También se pueden utilizar los valores calculados por los centros de análisis desde un modelo ionosférico global o regional incluido en el mensaje de navegación.

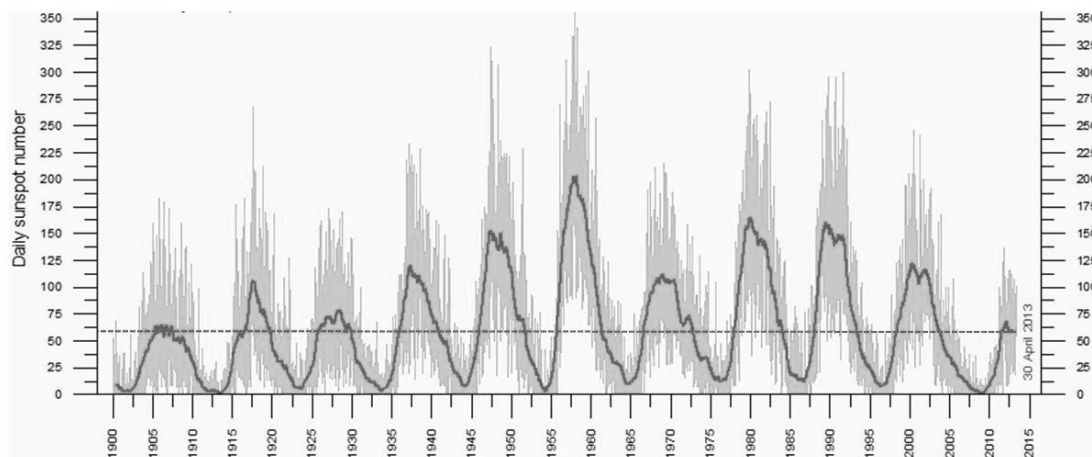


Figura 5.11: Distribución de los ciclos solares desde 1900 a 2013 según el número de manchas solares (*sunspot*) sobre su superficie. Fuente <http://www.metoffice.gov.uk/>

### Coeficientes del mensaje de navegación

En primer lugar se puede plantear una primera corrección utilizando para ello los coeficientes transportados en el mensaje de navegación. Mediante este procedimiento se consigue reducir únicamente un 50 % del efecto ionosférico ya que los coeficientes que se utilizan vienen proporcionados directamente por los satélites. Además tendría el problema de la dependencia que conlleva la hora del día, la estación del año, la actividad solar y el lugar de observación.

El uso en estos coeficientes sería aceptable para posicionamiento diferencial en líneas geodésicas de longitud no superior a los 100 kilómetros, siendo insuficiente para líneas geodésicas de una longitud mayor y para posicionamiento puntual de precisión PPP debido a su efecto limitado.

### Modelos ionosféricos globales

El Centro de Determinación de Órbitas en Europa (CODE) utiliza la red permanente IGS para proveer de Mapas Ionosféricos Globales (GIM) que contienen el contenido vertical TEC (vTEC) en diferentes mallados.

El vTEC se modela en un marco de referencia solar-geomagnético utilizando armónicos esféricos con una extensión de orden 15. Para convertir los valores

de TEC a vTEC es necesario aplicar un modelo en el que participa el ángulo de elevación en el punto de intersección de la señal con la ionosfera (punto *Ionospheric Piercing*, IP), concentrada en una capa simple de grosor infinitesimal (*Modified Single-Layer Model*, M-SLM) tal como se puede observar en la figura 5.12 (Schaer, 1997). Este ángulo de elevación  $z'$  se puede obtener utilizando la siguiente expresión:

$$\text{sen } z' = \frac{R}{R_E + H} \text{sen } z \quad (5.42)$$

donde  $R$  es la distancia geocéntrica a la estación,  $R_E$  es el radio de la Tierra,  $H$  es el valor medio de altura de la ionosfera, normalmente 350 kilómetros y  $z'$  y  $z$  son los ángulos cenitales del satélite en el punto IP y en el lugar de observación respectivamente.

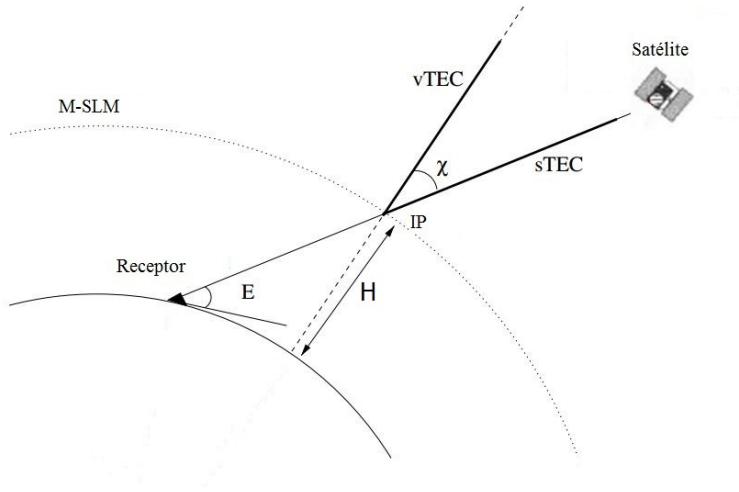


Figura 5.12: Representación de la señal sobre la ionosfera con la información necesaria para obtener el vTEC. Fuente Nava et ál. (2007)

La Agencia NOAA calcula también mapas de TEC en tiempo real sobre el continente americano en base a estaciones GPS en tierra. Estos mapas están dados con un intervalo de tiempo de 15 minutos sobre una malla de  $1^\circ$  de resolución en latitud y longitud para el vTEC y su variación temporal.

### Modelo Klobuchar

El modelo Klobuchar (Klobuchar, 1986) aproxima el retardo temporal vertical para medidas de código introduciendo los coeficientes transmitidos en el mensaje de navegación con esta expresión:

$$\Delta t^{Iono} = A_1 + A_s \cos \left( \frac{2\pi(t - A_3)}{A_4} \right) \quad (5.43)$$

donde  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  y  $A_4$  se calculan a partir de dos coeficientes  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  distribuidos en el mensaje de navegación GPS. También son necesarios el tiempo local  $t$  del punto IP y la distancia esférica entre el polo geomagnético y el IP ( $\varphi_{IP}^m$ ).

### Modelo NeQuick

Es un modelo tridimensional de densidad electrónica que depende del tiempo desarrollado por [Radicella y Leitinger \(2001\)](#). Este modelo ha sido adoptado por la Unión de Telecomunicaciones Internacional (ITU) como adecuado para la representación del TEC, y propuesto por el proyecto Galileo para la corrección del retardo ionosférico en posicionamiento monofrecuencia. En este caso, la corrección del retardo ionosférico está dado con un nivel de ionización efectivo denominado  $A_z$  que es válido para todo el mundo y aplicable para un período de 24 horas,

$$A_z(v) = a_o + a_1 v + a_2 v^2 \quad (5.44)$$

donde  $v$  es la inclinación magnética modificada calculada a partir de la caída magnética y la latitud del lugar  $\varphi$ . Los diferentes coeficientes  $a_o$ ,  $a_1$  y  $a_2$  se podrán extraer del mensaje de navegación Galileo.

### Combinación lineal de frecuencias

En receptores bifrecuencia es posible plantear combinaciones lineales de las fases observadas para resolver la problemática planteada por la ionosfera en el retardo de la señal. Puesto que  $\phi_1$  y  $\phi_2$  son las fases de las frecuencias L1 y L2 respectivamente, un caso usual de esta combinación sería:

$$\phi = n_1\phi_1 + n_2\phi_2 \quad (5.45)$$

Y puesto que  $\phi_i = f_i t$  se podría expresar la fórmula (5.45) en función de la frecuencia siendo  $\lambda = \frac{c}{f}$

$$f = n_1 f_1 + n_2 f_2 \quad (5.46)$$

A partir de aquí se pueden establecer varias combinaciones lineales que definen las observaciones de código y fase según las frecuencias de entrada. Para el caso de eliminar el efecto ionosférico de primer orden, se puede formar una combinación lineal denominada libre-ionosfera con los siguientes observables ([Moreno, 2012](#)):

$$P_{IF} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad L_{IF} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (5.47)$$

donde  $P_i$  y  $L_i$  representan las observaciones código y fase GNSS en las distintas frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ . Esta combinación elimina prácticamente la totalidad del efecto ionosférico el cual depende de la inversa del cuadrado de la frecuencia.

## 5.4.2. Órbitas

En el problema de posicionamiento es necesario resolver el modelo vectorial formado por el satélite, el centro de masas de la Tierra y el receptor. Es importante, por tanto, conocer con precisión la posición del satélite en cada instante de tiempo mediante el vector geocentro-satélite (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008). Para la determinación de este vector es necesario tener las coordenadas cartesianas del mismo a partir de los elementos orbitales y sus variaciones temporales (efemérides del satélite).

Dentro de las efemérides se diferencian varios grupos según la latencia en su generación y la calidad de los parámetros calculados: Las efemérides transmitidas (*broadcast ephemeris*) y las efemérides para postproceso, con las variantes ultrarápida, rápida y precisa.

### 5.4.2.1. Efemérides transmitidas

Las efemérides transmitidas son aquellas que vienen incluidas directamente con la señal GPS y que están asociadas a la observación (Seeber, 2003). Son utilizadas para posicionamiento en tiempo real y para aquellos casos en los que el posicionamiento no requiera de gran precisión.

El proceso de cálculo de estas efemérides queda definido en los siguientes pasos: En primer lugar se calcula una órbita de referencia utilizando para cada satélite las observaciones de la semana anterior, esta órbita tiene una precisión de varios cientos de metros. Posteriormente las estaciones de control recogen datos reales de la órbita del día anterior para, de este modo, analizar las discrepancias entre las observaciones reales y las generadas como referencia. A partir de estos datos reales se puede estimar una serie de correcciones sobre la órbita de referencia donde se incluyen una corrección por propagación atmosférica (ionosfera y troposfera), una corrección relativista y otra por variaciones en la orientación del eje de rotación de la Tierra. Introduciendo un filtro Kalman sobre estas correcciones se estiman los parámetros correspondientes a las efemérides transmitidas:

- 6 elementos orbitales del satélite.
- 3 parámetros que definen la marcha del reloj o relojes del satélite.
- 2 parámetros para todos los relojes de las estaciones que han intervenido en el cálculo menos una, que es el oscilador de referencia que define la escala de tiempo.
- Un factor de escala troposférico.

- 3 parámetros relativos al eje de rotación de la Tierra.

Toda esta información será enviada posteriormente al satélite desde las estaciones de control para ser incluida en el mensaje de navegación. Las efemérides transmitidas tienen como características la extrapolación de las órbitas entre 12 y 36 horas, su referencia al elipsoide WGS84 y una indeterminación que oscila entre los 5 y 10 metros de error.

#### **5.4.2.2. Efemérides para postproceso**

Las efemérides transmitidas, al estar asociadas al mensaje de navegación, pueden ser utilizadas para determinar la posición en tiempo real. Esto incide claramente en la precisión de ese posicionamiento ya que las órbitas de los satélites en estas efemérides llevan implícito un error que se traslada al receptor. La magnitud de esta desviación alcanza un nivel de incertidumbre de 1 a 3 metros en planimetría.

Las efemérides para postproceso tienen una precisión superior a las transmitidas y son aptas para cálculos donde es necesario una buena determinación orbital. Son generadas a partir de observaciones con redes de seguimiento y cálculos realizados por diversas instituciones que garantizan su precisión. Dentro de este grupo se pueden diferenciar según su latencia las efemérides ultrarápidas, rápidas y precisas.

Las efemérides ultrarápidas (IGU) reemplazaron a las antiguas órbitas IGP y contienen 48 horas de órbitas, las primeras basadas en observaciones actuales y las segundas con un predicción ([IGSMail-3088, 2000](#)). Estos productos se generan dos veces al día a las 03:00 y 15:00 UTC y su última observación es de 3 horas antes. La característica principal de estas efemérides es que pueden ser utilizadas en aplicaciones en tiempo real y para misiones LEO. Mejoran las precisiones facilitadas por las transmitidas llegando al nivel de los 20 centímetros en planimetría y 5 centímetros en estimación orbital.

Respecto a las efemérides rápidas (IGR), se combinan 17 horas después del final del día de observación, esta latencia se debe principalmente a la diferencia de datos disponibles de las estaciones de la red global IGS ([Kouba, 2009](#)). Alcanzan una precisión de unos 2,5 centímetros en la determinación orbital estando disponibles a las 17 horas UTC diariamente.

En el caso de las efemérides precisas o finales, se combinan las observaciones de un total de 8 estaciones de análisis IGS utilizando para ello 6 programas de tratamiento de la señal (BERNESE, GAMIT, GIPSY-OASIS, NAPEOS, EPOS y PAGES) para generar así productos disponibles cada jueves, dos semanas después de la última observación. Las precisiones alcanzadas son de 2,5 centímetros en estimación orbital [Kouba \(2005\)](#). En la tabla 5.3 se pueden observar las características de las efemérides facilitadas por IGS.

Efemérides	Precisión	Latencia	Actualizaciones	Muestreo
Navegación	100 cm	Tiempo real		Diario
Ultrarápidas (predichas)	5 cm	Tiempo real	03,09,15,21 UTC	15 minutos
Ultrarápidas (observadas)	3 cm	3-9 horas	03,09,15,21 UTC	15 minutos
Rápidas	2.5 cm	17-41 horas	17 UTC diario	15 minutos
Finales	2.5 cm	12-18 días	cada jueves	15 minutos

Tabla 5.3: Efemérides facilitadas por IGS. Precisión en la determinación orbital en centímetros. Fuente <http://igscb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>

### 5.4.3. Osciladores

La variable tiempo tiene una importancia vital en el cálculo de la distancia satélite-receptor ya que las medidas GPS están ligadas a una correcta determinación del tiempo de viaje de la señal. De la calidad de esta determinación depende directamente la precisión con la que se llegue a obtener la posición.

Cada satélite del sistema lleva un reloj que actúa como tiempo y frecuencia base para la realización del tiempo GPS. Para compensar los efectos relativistas, el reloj del satélite va  $38.5 \mu s/día$  más rápido, lo que absorbe el 99.6 % de este efecto (Seeber, 2003). Si fuera necesario, la MCS aplica otra corrección para sincronizar el reloj individual del satélite con el sistema de tiempo, ya que una desviación de  $1 \mu s$  en el reloj del satélite se traduce en 300 metros de error en el observable pseudodistancia.

Puesto que en la sincronización con los satélites se establecen variaciones del orden del nanosegundo, los osciladores elegidos para los satélites GPS son de rubidio y cesio, ya que estos poseen una estabilidad alta a corto plazo de  $10^{-9}$  o  $10^{-10}$ . El segmento de control es el encargado del mantenimiento de estos relojes mediante el cálculo de los coeficientes de un polinomio de corrección de segundo orden que posteriormente serán enviados en el mensaje de navegación. De este modo se mantienen los relojes sincronizados con una desviación de 5 a 10 nanosegundos (Misra y Enge, 2001). Los coeficientes del polinomio de corrección están en función del instante de referencia  $t_o$  y de 3 parámetros  $a_o$ ,  $a_1$  y  $a_2$ :

$$dt = a_o + a_1(t - t_o) + a_2(t - t_o)^2 \quad (5.48)$$

Los requerimientos de calidad en el oscilador del receptor sin embargo no son tan altos como en el satélite. En este caso se necesita que sea lo suficientemente estable como para hacer las medidas de pseudodistancia con código y fase (Seeber, 2003). Normalmente un oscilador de cuarzo de mediana calidad es suficiente, puesto que el error en el receptor puede ser eliminado con las dobles diferencias de las observaciones de fase o con ficheros precisos del estado del reloj. Algunos receptores tienen la capacidad además de admitir una conexión a una base externa

que dispone de tiempo atómico del orden de  $10^{-14}$ , esto permite una precisión mayor en la variable tiempo y, en consecuencia, una reducción de la magnitud de la desviación.

Aunque los osciladores de los satélites y del receptor sean altamente estables, siempre existirá una degradación que afectará a la sincronización de las escalas individuales de ambos con la escala de tiempo GPS (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008).

La corrección que se transmite desde tierra desde las instituciones encargadas del control de estos osciladores, como son IGS y CODE, es casi total, a excepción de un pequeño error residual de unos pocos nanosegundos que es imposible de predecir. Dichos organismos proveen de ficheros de reloj con extensión \*.CLK a diferente muestreo para que puedan ser utilizados en postproceso con las observaciones GPS (Hugentobler et ál., 2006).

Respecto al muestreo, IGS estableció como oficiales los ficheros de combinación de reloj a 5 minutos en noviembre de 2000 (Kouba y Springer, 2001) sustituyendo a los 15 minutos de muestreo previos. Desde entonces, El paso de 15 a 5 minutos permitió una interpolación libre de la disponibilidad selectiva en los relojes con una desviación por debajo del nivel del decímetro (Zumberge y Gendt, 2001). Con la llegada de las aplicaciones en tiempo real, se comenzaron a generar productos de reloj con un muestreo de 30 segundos desde enero de 2007, permitiendo bajar así el error de estimación hasta el nivel del centímetro. Desde 2008 CODE también incluye ficheros a un muestreo de 5 segundos. En la tabla 5.4 se pueden observar las características de los ficheros de reloj facilitados por IGS.

Efemérides	Precisión	Latencia	Actualizaciones	Muestreo
Navegación	5 ns	Tiempo real		Diario
Ultrarápidas (predichas)	3 ns	Tiempo real	03,09,15,21 UTC	15 minutos
Ultrarápidas (observadas)	0.15 ns	3-9 horas	03,09,15,21 UTC	15 minutos
Rápidas	0.075 ns	17-41 horas	17 UTC diario	5 minutos
Finales	0.075 ns	12-18 días	cada jueves	30 segundos

Tabla 5.4: Ficheros de reloj facilitados por IGS. Precisión en la determinación del oscilador del satélite en nanosegundos. Fuente <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>

#### 5.4.4. Pérdidas de ciclo

Durante los períodos de observación la señal GPS se registra de manera continua por el receptor, esto incluye un conteo interno del número entero de ciclos de la onda portadora para, de este modo, mantener constante la ambigüedad inicial. Sin embargo, en situaciones especiales como obstáculos en la observación, fallo

de recepción o cambios ionosféricos, puede perderse esta fase inicial generándose un salto en el registro (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008).

Tras una pérdida de ciclos prolongada, el receptor debe reiniciar el registro continuo a fin de obtener la ambigüedad inicial. Para la detección de las épocas de observación con estos saltos se utiliza una combinación lineal al igual que en el caso de la corrección ionosférica. La más usual es la combinación lineal Melbourne-Wübbena (MW) (Melbourne, 1985; Wübbena, 1985).

$$P_{MW} = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \quad (5.49)$$

donde  $P_i$  y  $L_i$  representan las observaciones de código y fase GPS en las distintas frecuencias  $f_1$  y  $f_2$ .

La combinación Melbourne-Wübbena estima la ambigüedad del tipo *wide-lane* como diferencia de una combinación lineal *wide-lane* (WL) de fase y otra *narrow-lane* (NL) de código mediante la fórmula  $B_{MW} = L_{WL} - P_{NL}$ . Esta combinación tiene dos ventajas, por un lado la combinación WL tiene una longitud de onda mayor que la de la señal individualmente, lo que permite un aumento en el espaciado de las ambigüedades, y por otro, la combinación NL de código permite una reducción del ruido de la observación (Blewitt, 1990). En la figura 5.13 se observa el efecto producido al aplicar esta combinación lineal.

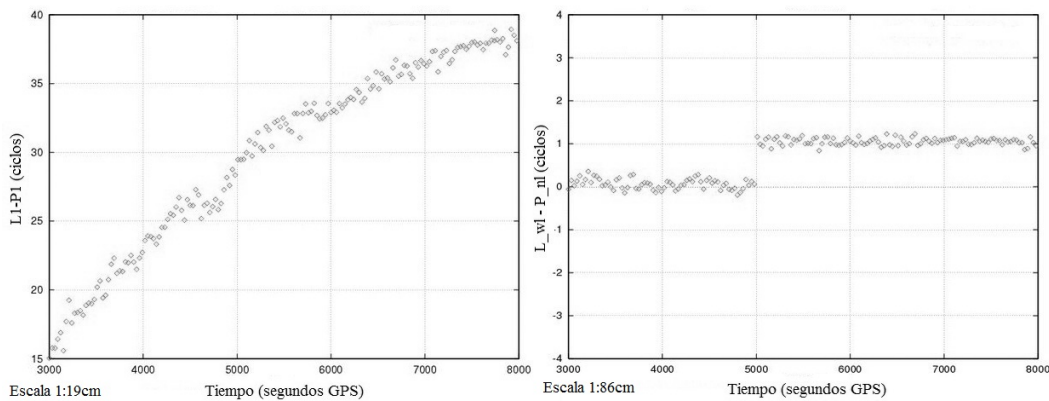


Figura 5.13: Detección de saltos de ciclo con combinación Melbourne-Wübbena. A la izquierda el efecto de un salto de ciclo en la L1 con la diferencia L1-P1 y a la derecha con la combinación Melbourne-Wübbena. Fuente [www.navipedia.net](http://www.navipedia.net)

Otras posibles soluciones que se han desarrollado para detectar los saltos de ciclo serían la combinación lineal de geometría libre para las medidas de fase ( $L_1 - L_2$ ), el análisis de la variación temporal en el TEC (Liu, 2011), la aplicación de un filtro Kalman específico para la detección de los saltos (Bastos y Landau, 1988) y una solución basada en la aproximación Bayesiana y centrada en el tamaño de las pérdidas de ciclo en observaciones no diferenciadas (de Lacy et ál., 2008).

### 5.4.5. Geometría de los satélites

La geometría de los satélites observados simultáneamente es un factor importante para el cálculo de coordenadas cartesianas absolutas (Figura 5.14). Al unir el receptor con cada uno de los satélites observados, se obtiene un prisma con vértice en el propio receptor y cuya figura va cambiando de forma y volumen continuamente debido al movimiento de los satélites (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008).

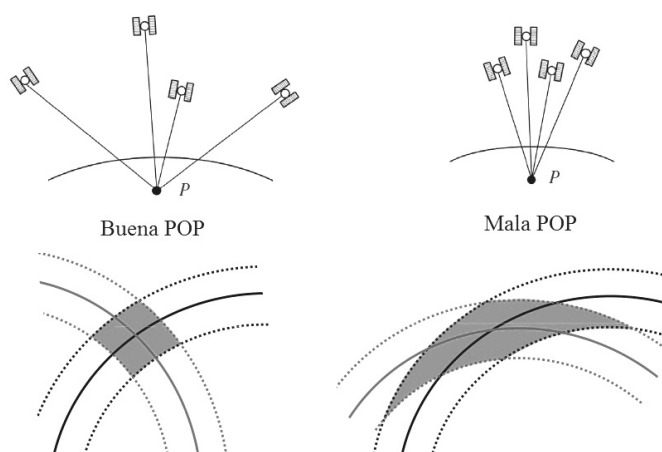


Figura 5.14: Geometría de los satélites dependiendo de su distribución y efecto en la precisión del posicionamiento. Fuente Seeber (2003)

La variable que lo define está relacionado con la dispersión de la precisión, o factor DOP, un escalar que representa la contribución de la configuración geométrica de los satélites a la precisión del posicionamiento. La expresión que se utiliza para el cálculo sería:

$$\sigma = DOP \sigma_o \quad (5.50)$$

donde  $\sigma$  es la exactitud obtenida en el posicionamiento y  $\sigma_o$  la exactitud en cada medida realizada o desviación típica a priori.

Dentro del factor DOP, existen varios componentes dependiendo de la variable que se refiera. Puede tratarse de VDOP o HDOP, para desviaciones típicas de la altura y la componente horizontal respectivamente; PDOP o precisión en el posicionamiento absoluto y GDOP, como precisión en el posicionamiento absoluto y el tiempo. Este último sería el que englobaría a todos los demás (Seeber, 2003).

En el caso de tener valores pequeños de estos parámetros se indicaría una buena distribución de los satélites en su geometría para el cálculo posicional, siendo el valor ideal próximo a 1. Debido a la velocidad relativa de los satélites respecto

al observador, estos coeficientes tienen una variación lenta pero constante, lo que permite una actualización de sus valores cada 15 minutos en la estimación de la geometría.

### 5.4.6. Centro de fase de las antenas (PCO)

La posición del centro de fase de las antenas del receptor y del satélite (PCO) tienen importancia a la hora de tratar la señal GPS. Esto se debe a que las observaciones realizadas establecen la distancia entre los centros de fase de las dos antenas, los cuales varían con la frecuencia y la dirección satélite-receptor (Mader, 1999).

Respecto a la antena del satélite, las coordenadas precisas facilitadas por las estaciones de control son dadas al centro de masas del satélite (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008). Generalmente el centro de masas no coincide con el centro de fase de emisión de la antena, definiendo un offset o diferencia que debe modelizarse (Figura 5.15).

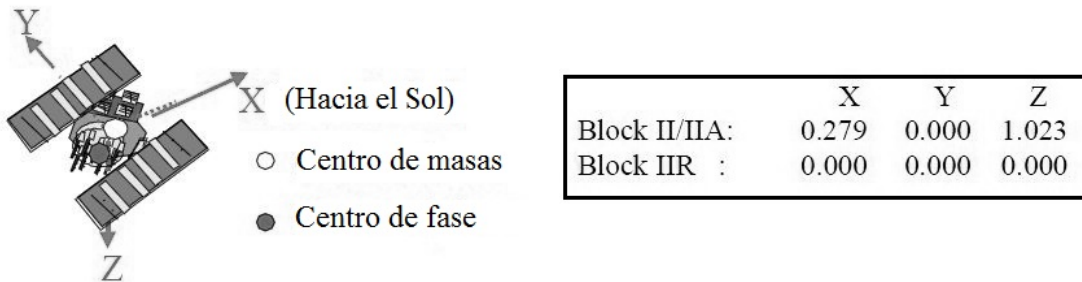


Figura 5.15: Representación de los offsets relativos del centro de fase en el satélite GPS (Válido hasta la semana GPS 1399). Se muestran también los offsets adoptados por IGS para los bloques II/IIA y IIR en el marco de referencia fijo del cuerpo del satélite, unidades en metros. Fuente Kouba (2009)

Para la calibración de este offset se utiliza la relación existente entre el ángulo del nadir del satélite  $z'$  y el ángulo cenital del receptor  $z$  definida en (5.51). Esta ecuación está expresada en función del radio de la Tierra  $R$  y la distancia geocéntrica del satélite  $r$ . Es importante destacar las restricciones para cada ángulo, ya que el ángulo nadiral del satélite varía entre  $0^\circ$  y  $15^\circ$  (Rothacher, 2001), mientras que el ángulo cenital del receptor tiene un rango de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

$$\text{sen}(z') = \frac{R}{r} \text{sen}(z) \tag{5.51}$$

Para el receptor, el centro de fase de la antena es el punto físico donde se realiza la recepción de la señal del satélite (Figura 5.16). Asimismo hay que tener en cuenta que la corrección del centro de fase de la antena no es estable en el tiempo, sino que varía según el acimut de llegada de la señal, altura, intensidad y además tiene una magnitud diferente según se trate de la señal L1 o L2.

La corrección del centro de fase del receptor vendrá dada por dos componentes, por un lado el offset o PCO que es constante y viene dado por el fabricante para las frecuencias L1 y L2, y por otro la excentricidad o PCV (Geiger, 1988), que es variable según la dirección de llegada de la señal y que da la precisión de la propia antena.

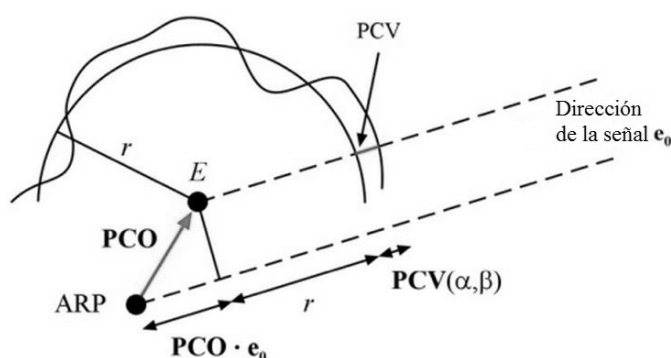


Figura 5.16: Modelo de antena de un receptor con los puntos y vectores de referencia respecto a la dirección de la señal. Fuente Zeimetz y Kuhlmann (2008)

En la figura 5.16 se observa que la distancia medida  $S_{ARP}$  depende de la dirección de llegada de la señal que sigue esta expresión:

$$S_{ARP} = r + PCO \cdot e_o(\alpha, \beta) + PCV(\alpha, \beta) + \epsilon \quad (5.52)$$

donde  $r$  indicaría el error,  $e_o$  el vector unitario en la dirección  $\alpha$  y  $\beta$  del satélite y  $\epsilon$  el ruido de la observación (Zeimetz y Kuhlmann, 2008).

Hasta la semana GPS 1400, las correcciones al centro de fase de la antena eran relativas a una antena de referencia determinada, la Dorne Margolin Choke Ring tipo T ( $AOAD/M_T$ ). Esta antena se consideraba con unos valores nulos de PCV y sin ninguna dirección de dependencia en el centro de fase (Mader, 1999). La corrección relativa es la base de los productos IGS01 generados por IGS hasta esa fecha.

A partir del 5 de noviembre de 2006 (semana 1400) la corrección pasó a ser absoluta (Gendt, 2006), obtenida por robots en cámaras anecoicas para evitar

así la reflectividad de la señal. La calibración absoluta de la antena se basa en considerar los valores PCV calibrados de las antenas del receptor junto a su dependencia acimutal (Wübbena et ál., 2000), y las PCV de las antenas de los satélites en un modelo dependiente del nadir y diferente para cada satélite (Schmid y Rothacher, 2003). Esta nueva calibración es consistente con los productos IGS05, tales como efemérides y relojes, de IGS. En abril de 2011, con la adopción del nuevo marco de referencia IGS08 (Schmid, 2011), se actualizaron las nuevas correcciones de centro de fase de la antena de los satélites y de los receptores con la denominación IGS08. Estas calibraciones deben ser utilizadas conjuntamente con los productos de IGS basados en este marco.

Para la descarga de los datos de calibración de las antenas de los satélites GPS y GLONASS se puede utilizar la web del JPL [ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/pcv\\_archive/](ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/pub/station/general/pcv_archive/). En esta dirección se encuentran los ficheros tipo ANTEX actualizados periódicamente con extensión \*.ATX. En ellos viene incluida toda la información necesaria para la corrección del centro de fase con el offsets y los valores de excentricidad.

Para los datos de las antenas de los receptores existe la web <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/> donde vienen indicadas, según fabricante, los valores correspondientes al offset y excentricidades para poder ser incluidos en el procesado. Para un correcto uso de estos productos es conveniente que la orientación de la antena sea estable en la observación, ya que éstas se montan en fábrica con una orientación determinada a la que están referidas sus calibraciones.

#### 5.4.7. Efecto Wind Up

Este efecto, conocido también como efecto de orientación de la antena del satélite, se debe a la propia orientación que deben hacer los satélites para colocar correctamente los paneles solares en dirección al sol en casos concretos (Wu et ál., 1993), esto provoca una variación en el centro de masas del satélite que afecta directamente a la medida y que no puede ser completamente eliminado utilizando observaciones diferenciadas.

Las fórmulas que expresan este efecto vienen derivadas de (Wu et ál., 1993) donde se asume que la señal GPS es una onda polarizada circular a la derecha (Figura 5.17). La corrección de fase  $\Delta_\Phi$  se determina a partir del ángulo entre los dipolos efectivos del receptor y de la antena del satélite.

$$\Delta_\Phi = 2N\pi + \delta\phi \quad (5.53)$$

donde  $\delta\phi$  es una parte fraccional de ciclo calculada a partir de los dos dipolos y  $N$  es el valor entero más cercano obtenido en base a la diferencia del valor  $\Delta_\Phi$  previo y de  $\delta\phi$ . Esta ecuación asume que el cálculo está realizado a un índice de

muestreo lo suficientemente alto como para que el cambio en la corrección esté siempre por debajo de  $180^\circ$  entre dos épocas sucesivas (Mervart, 1995).

En el caso de eclipses, los satélites se ven también afectados por rápidas rotaciones llamadas *noon turns* y *midnight turns* para reorientar sus paneles al Sol. Estas rotaciones pueden llegar a ser de hasta una revolución en menos de 30 minutos y deben ser compensadas (Bar-Server, 1996).

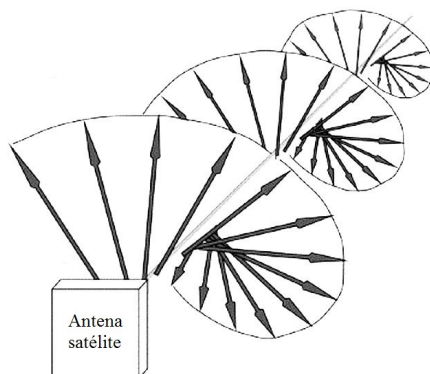


Figura 5.17: Representación de una onda polarizada circular a la derecha

Este efecto actúa solo sobre las medidas de la fase de la portadora pero no sobre las pseudodistancias de código. La fase de la portadora observada depende de la orientación de la antena del satélite por lo que cualquier rotación alrededor de su eje cambiará la fase de la portadora en una magnitud de hasta un ciclo, lo que corresponde con la revolución completa de la antena. La corrección asociada a este efecto recibe el nombre de *corrección Wind-Up* y, aunque de pequeña magnitud, debe ser considerada en el posicionamiento puntual de precisión (PPP).

#### 5.4.8. Retardos electrónicos

La señal GNSS generada por el satélite tiene que viajar por su interior del mismo hasta ser emitida por el centro de fase de la antena, posteriormente la señal es recibida por la antena del receptor y asimismo tiene que viajar por sus circuitos antes de ser procesada. Estos retardos son diferentes dependiendo de la frecuencia y el código que se transmita y se conocen como retrasos electrónicos. Para las observaciones de fase de la portadora, el retraso instrumental es absorbido por las ambigüedades iniciales, sin embargo, el error introducido en las observaciones de código puede llegar a ser de varios nanosegundos.

Aunque el retraso electrónico en el receptor no puede ser determinado, para el caso de los retrasos en los satélites el CODE proporciona una serie de ficheros con extensión \*.DCB (*Differential Code Biases*) que pueden ser descargados en

la dirección <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/> y que permiten corregir el efecto diferencial entre los códigos P1, P2 y C1. Los ficheros reciben la denominación  $DCB_{P1-P2}$  y  $DCB_{P1-C1}$ .

En el caso de  $DCB_{P1-C1}$ , los valores son calculados en el transcurso de la solución de los parámetros ionosféricos de la combinación lineal ionosfera-libre (Dach et ál., 2007) mientras que  $DCB_{P1-P2}$  se obtiene en el curso del análisis global de relojes GNSS (Schaer, 2000). Estas tendencias son diferentes para los satélites GPS y para GLONASS y aunque no son constantes, si tienen una gran estabilidad en el tiempo (Dach et ál., 2007).

### 5.4.9. Efectos relativistas

Los efectos relativistas se producen al introducir una corrección de relatividad general a la distancia geométrica. Debido al campo gravitatorio terrestre se produce una curvatura espacio temporal que afecta a la transmisión de la señal GPS, y una diferencia en el estado del reloj del satélite y del receptor al estar sometidos a un campo gravitatorio diferente (Zhu y Groten, 1988).

En el caso del reloj del satélite, se produce un adelanto del mismo respecto al situado en tierra. Esta desviación se puede compensar aplicando una corrección a la frecuencia original generada por los satélites ( $f_o = 10,23MHz$ ) derivada de una órbita circular. La magnitud de esta corrección para observaciones GPS es de  $df \approx -4,5674,10^{-3}Hz$  (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008). Esta aproximación genera a su vez un error periódico de pequeña magnitud sobre el reloj del satélite que varía en función de la posición del mismo (Ashby, 2003). Como se comentó en la sección 5.4.3, el efecto relativista sobre el reloj del satélite viene incluido en la corrección polinomial del mensaje de navegación, pudiéndose utilizar a la hora del procesamiento de la señal para su corrección.

Durante la propagación de la señal aparecen una serie de efectos relativistas a tener en cuenta. Por un lado existe una variación en la posición entre el satélite y el receptor debido a la órbita y a la propia rotación terrestre, esto provoca que la distancia medida no corresponda con la distancia en la época de transmisión. Este efecto, que recibe el nombre de efecto Sagnac, puede ser modelizado mediante la siguiente ecuación (Su, 2001):

$$\delta^{rel} = \frac{1}{c}(\rho_r - \rho^s) \cdot (\omega_e \times \rho_r) \quad (5.54)$$

donde  $\rho^s$  y  $\rho_r$  son la posición instantánea del satélite y del receptor respectivamente y  $\omega_e$  es el vector de rotación de la Tierra. El campo gravitatorio terrestre provoca además una curvatura espacio temporal que se refleja en una medida de distancia mayor que la esperada en un espacio Euclídeo. Esta desviación tiene una magnitud máxima de 18.6 milímetros (Holdridge, 1967).

Otro efecto destacado en la transmisión de la señal es el retraso de propagación de la señal Shapiro, en honor a Irwin Shapiro que en 1964 detectó pequeñas variaciones de la velocidad en señales de radar en presencia del campo gravitatorio. Las pequeñas correcciones, que no superan los 2 centímetros en distancia, deben considerarse en Posicionamiento Puntual de Precisión (PPP) (Ashby, 2003).

Respecto a los efectos sobre el oscilador del receptor, cabe destacar que un receptor localizado en la superficie de la Tierra está rotando respecto al geocentro según una velocidad determinada. Dependiendo de la latitud del receptor existen diferencias en la marcha del reloj que puede llegar a ser de 10 nanosegundos en el Ecuador (Hoffmann-Wellenhof et ál., 2008).

Además, los usuarios que se encuentran en movimiento o a una altura determinada también deben aplicar correcciones a causa de su velocidad y altitud, aunque en la práctica estos efectos quedan absorbidos por la estimación del oscilador del receptor (Moreno, 2012)

#### 5.4.10. Efecto Multipath

El efecto multipath o multitrayectoria se produce por las reflexiones que afectan a la señal GPS debido a la presencia de cuerpos con alto grado de reflectancia en las proximidades del receptor (Figura 5.18). Produce un aumento de la trayectoria de la señal y por lo tanto un retardo en el tiempo de recepción de la señal (Moreno, 2012).

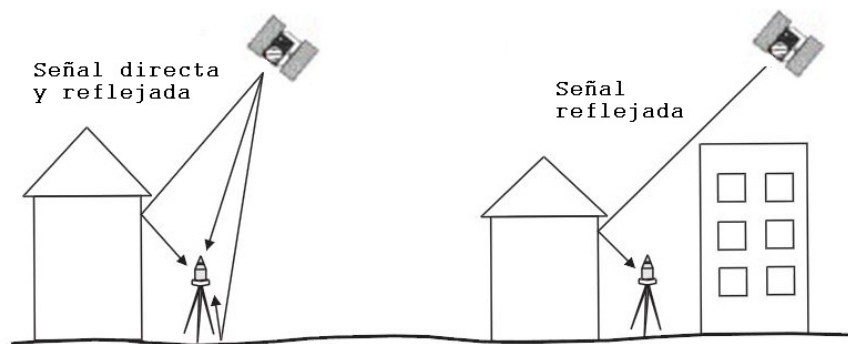


Figura 5.18: Efecto multipath sobre la trayectoria de la señal debido a la presencia de obstáculos con reflexiones múltiples. Fuente Seeber (2003)

Básicamente el efecto multitrayectoria puede agruparse en tres clases diferentes según el tipo y tamaño del objeto que lo genere, el producido por la difusión de un área grande, el generado por un objeto concreto bien definido y aquellas

fluctuaciones de muy baja frecuencia asociadas generalmente a la reflexión en superficies de agua.

Las técnicas de posicionamiento no pueden corregir el multipath, ya que se trata de un efecto genuinamente asociado al sitio de observación, únicamente puede ser estimado utilizando una serie de combinaciones lineales de código y fase, aunque la corrección es compleja. Es necesario por tanto tener en cuenta unas consideraciones básicas a la hora de realizar la observación tales como la elección de un lugar adecuado, el establecimiento de una buena máscara de elevación, la colocación de una antena tipo *Choke Ring* (Moelker, 1997) o el uso de antenas con polarización de la señal (Aloi y van Graas, 2004) para evitar en lo posible este efecto.

Puesto que el multipath depende de la frecuencia, las medidas de fase se ven menos afectadas que las de código donde el efecto puede llegar a ser incluso de un metro. En casos extremos (cercañas de edificios, árboles...) el efecto se incrementa de manera significativa pudiendo ampliar el error hasta las decenas de metros (Nee, 1991) e incluso aparecer saltos de ciclo en la recepción de la señal.

#### 5.4.11. Problemas en los satélites

Para un correcto funcionamiento de los satélites, éstos reciben un mantenimiento continuado por parte de los centros de control en tierra. Los problemas derivados de fallos mecánicos o averías son registrados en un fichero especial anual del tipo SAT\_YYYY.CRX (Moreno, 2012) el cual es actualizado diariamente con el listado de problemas identificado en las rutinas de procesado. Para garantizar una calidad en el procesamiento, es necesario tener en cuenta estos problemas para eliminar las observaciones afectadas (Dach et ál., 2007).

Los problemas que quedan almacenados, como pueden ser los fallos en el satélite y los datos de código y fase erróneos, son codificados en el fichero incluyendo la acción definida en el centro de control a la hora del procesado. También se añade el número del satélite y el intervalo de tiempo durante el que se registró el problema. Estos ficheros pueden ser descargados a través de la web de la Universidad de Berna en la dirección [www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/GEN](http://www.aiub.unibe.ch/download/BSWUSER50/GEN).

#### 5.4.12. Mareas terrestres

La acción combinada de las fuerzas gravitatorias ejercidas por la Luna y el Sol, junto a la fuerza centrífuga asociada a la rotación terrestre, producen desplazamientos verticales periódicos sobre las masas de agua oceánica que reciben el nombre de mareas oceánicas (Benavent, 2011). En el caso de la Tierra sólida, este

efecto provoca deformaciones de menor magnitud comunmente conocidas como mareas terrestres.

Los desplazamientos verticales y horizontales causados por este efecto pueden ser expresados por armónicos esféricos basados en el número Love  $h_{nm}$  y el número Shida  $l_{nm}$ , los cuales no dependen significativamente de la latitud de la estación y de la frecuencia de marea (Wahr, 1981). Para alcanzar una precisión de 5 mm en la estimación, es necesario considerar los armónicos de segundo orden y los términos de corrección de altura tal como viene descrito en IERS (1989). El vector desplazamiento que modela este efecto en coordenadas cartesianas vendría dado en la siguiente expresión:

$$\Delta \vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM} \frac{r^4}{R_j^3} \Lambda + \Omega \quad (5.55)$$

$\Lambda$  y  $\Omega$  estarían definidos como:

$$\Lambda = 3 l_2 (\dot{R}_j \cdot \dot{r}) \dot{R}_j + \left[ 3 \left( \frac{h_2}{2} - l_2 \right) (\dot{R}_j \cdot \dot{r})^2 - \frac{h_2}{2} \right] \dot{r} \quad (5.56)$$

$$\Omega = [-0,025 m \text{ sen} \phi \text{ cos} \phi \text{ sen}(\theta_g + \lambda)] \dot{r} \quad (5.57)$$

donde  $GM$  y  $GM_j$  son los parámetros gravitacionales de la Tierra, la Luna ( $j = 2$ ) y el Sol ( $j = 3$ ).  $r$  y  $R_j$  son los vectores de estado geocéntricos de la estación, la Luna y el Sol, con los correspondientes vectores unitarios  $\dot{r}$  y  $\dot{R}_j$  respectivamente.  $l_2$  y  $h_2$  son los valores nominales de los números Love y Shida de segundo grado (0,609 y 0,085).  $\phi$  y  $\lambda$  son las coordenadas geográficas latitud y longitud del lugar de observación y  $\theta_g$  es el Tiempo Sidéreo Medio en Greenwich (Kouba, 2009).

La magnitud del efecto de marea puede alcanzar unos 30 centímetros en vertical (Figura 5.19) y hasta 5 centímetros en horizontal. Estaría dividido a su vez por un desplazamiento permanente dependiente de la latitud y por una parte periódica, predominantemente diurna y semidiurna. Aunque la parte periódica es promediada en posicionamiento estático con observaciones de 24 horas, la parte permanente, que puede alcanzar valores de 12 centímetros en vertical y 5 en horizontal, no se elimina en el procesamiento, generándose una desviación sistemática en la posición que es propia del lugar de observación (Kouba, 2009).

### 5.4.13. Carga Oceánica

Como consecuencia de las mareas oceánicas se produce además un fenómeno de carga sobre el fondo oceánico con una respuesta indirecta sobre la corteza terrestre que recibe el nombre de efecto oceánico indirecto o también efecto de carga oceánica. Este fenómeno, al estar dominado por la marea oceánica, tiene

una componente periódica diurna y semidiurna con un orden de magnitud inferior a la correspondiente marea terrestre (Kouba, 2009).

Este efecto se manifiesta ligado a la situación del receptor y debe considerarse para trabajos concretos como es el Posicionamiento Puntual de Precisión PPP. Tiene además un comportamiento que varía si se trata de una zona costera o de interior, ya que es un efecto indirecto de la marea oceánica. Además la composición de la corteza en el área y la reología de la misma influyen en su magnitud.

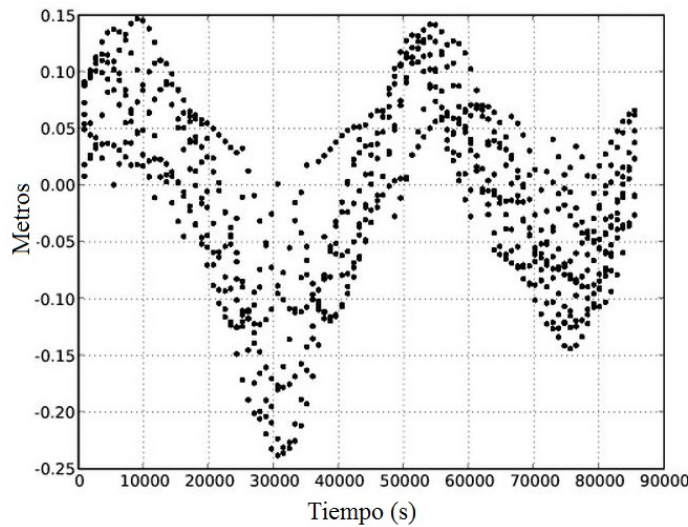


Figura 5.19: Representación de la marea terrestre registrada durante un día. Para el cálculo se utilizó la técnica PPP cinemático. Fuente [www.navipedia.net](http://www.navipedia.net)

Para la solución de modelos como el ZPD o los relojes es necesario incluir el cálculo de este efecto ya que de otro modo los efectos de carga oceánica se incluirían dentro del propio cálculo del ZPD y del reloj de la estación (Dragert et ál., 2000).

La modelización viene descrita en IERS (2010) y es posible gracias a las 11 componentes periódicas de las que está compuesto el efecto de marea como son los términos semidiurnos, diurnos, quincenales, mensuales y semianuales.

$$\Delta c = \sum_j f_j A_{cj} \cos(\omega_j + \chi_j + u_j - \Phi_{cj}) \quad (5.58)$$

donde  $f_j$  y  $u_j$  dependen de la longitud del nodo lunar y pueden ser considerados como  $f_j = 1$  y  $u_j = 0$  con una precisión de 1-3 milímetros. El sumatorio de  $j$  elementos representa las 11 ondas de marea designadas como: semidiurnas  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ , diurnas  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ , quincenal  $M_f$ , mensual  $M_m$  y semianual  $S_{sa}$  (Humphreys et ál., 2005).  $\omega_j$  y  $\chi_j$  son las velocidades angulares y los argumentos astronómicos a época  $t = 0h$  correspondientes a las ondas de marea  $j$ .

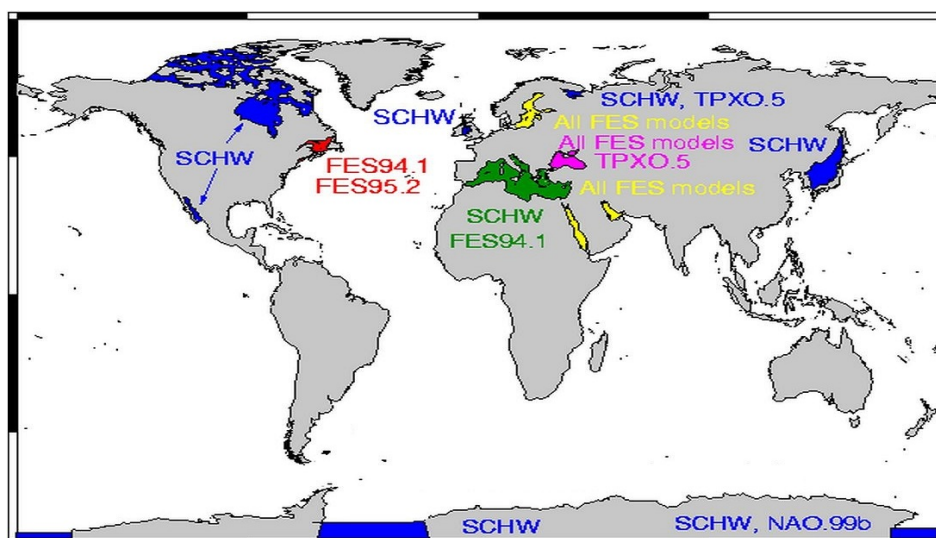


Figura 5.20: Áreas de cálculo de los modelos de carga oceánica. Las zonas marcadas indican el área donde un modelo determinado no lo incluye en el cálculo. Fuente <http://holt.oso.chalmers.se/loading/tidemodels.html>

La amplitud específica de la estación  $A_{cj}$  y la fase para la dirección vertical  $\Phi_{cj}$  pueden ser obtenidos a través de la aplicación online de carga oceánica del Observatorio Espacial de Onsala <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>, que genera un fichero a partir de las coordenadas geocéntricas o geodésicas de la estación con el modelo y formato especificados (Kouba, 2009). Esta página permite implementar un total de 15 modelos de carga oceánica entre los que se pueden destacar algunos empíricos como GOT00.2 y GOT99.2b, los que utilizan la aproximación hidrodinámica como TPXO.5 y TPXO.7.1 y los de solución de elementos finitos (Lefevre et ál., 2000) (*Finite Element Solution*, FES) como son el FES94.1, FES95.2, FES98, FES99 y FES2004 (Figura 5.20).

De los modelos anteriores, el estudio desarrollado en Hefty (2008) considera el FES2004 como el más adecuado para la modelización de la carga oceánica. Este modelo, descrito en Letellier (2004), utiliza una malla de  $0.125^\circ$  de paso en latitud y longitud y asimila la altimetría del satélite TOPEX/Poseidon a un modelo hidrodinámico. Presenta además armónicos elevados (M3, M4 y M6) que amplían las 11 ondas de marea originales.

Respecto a la magnitud de este efecto, normalmente la componente  $M_2$  es la mayor y no excede de los 5 cm en dirección vertical y de 2 cm en horizontal para estaciones situadas en la costa. Para puntos 1000 kilómetros tierra adentro este efecto se reduce a 1 cm. La componente tangencial llega a ser una tercera parte de las magnitudes en la vertical (IERS, 2010).



# 6

## Procedimientos y software

---

*“La cantidad de entropía del  
Universo tiende a incrementarse  
en el tiempo”*

2º principio de la termodinámica

### 6.1. Posicionamiento

#### 6.1.1. Introducción

Para resolver el problema de posicionamiento con GPS es necesario considerar las ecuaciones básicas de observación de código  $p$  y fase  $\Phi$  desarrolladas previamente en (5.11) y (5.34) que se incluyen a continuación:

$$\begin{aligned} p &= \rho + c(dT - dt) + d_{trop} + d_{ion} + \epsilon_p \\ \Phi &= \rho + c(dT - dt) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \epsilon_\Phi \end{aligned} \quad (6.1)$$

A partir de éstas, y según como se desarrolle la resolución de sus parámetros, surgen las distintas tipologías de posicionamiento GPS que actualmente se encuentran disponibles. La clasificación general aceptada universalmente depende del observable utilizado (código o fase), si el receptor se encuentra parado o en movimiento (estático o cinemático), en función del tipo de solución y el número de receptores utilizados (absoluto o relativo) y en función de la latencia en el resultado final (tiempo real, RTK o post-proceso) ([Seeber, 2003](#)).

En este capítulo se incluyen algunas técnicas de posicionamiento absoluto y relativo como paso previo para introducir la metodología de Posicionamiento Puntual de Precisión (PPP). Al final del mismo se describen las aplicaciones de procesado PPP más utilizados en sus versiones software y online.

### 6.1.2. Posicionamiento absoluto por código

El objetivo en este tipo de posicionamiento es determinar las coordenadas y el estado del reloj del receptor a partir de las observaciones de pseudodistancias con código. En este caso se parte de la ecuación general de pseudodistancias  $p$  descrita en (6.1) y definida para un determinado satélite  $k$ . En ella se pueden conocer los siguientes parámetros de la ecuación original:

- El offset del reloj del satélite  $dt^k$ , que está modelizado por una aproximación polinómica del tipo  $dt = a_o + a_1(t - t_o) + a_2(t - t_o)^2$ .
- Las coordenadas del satélite  $x^k, y^k, z^k$ , en base a las efemérides que vienen definidas a partir de seguimientos precisos desde organismos oficiales.
- El retardo troposférico e ionosférico  $d_{trop}$  y  $d_{ion}$ , obtenido a partir de combinaciones lineales utilizando las dos frecuencias L1 y L2 o mediante modelos de corrección apropiados.
- El parámetro  $\epsilon_p$ , que incluye el conjunto de errores aleatorios tales como el retardo debido a la presencia de cuerpos reflectantes, el producido por el recorrido de la señal dentro del receptor, los residuos resultantes de la modelización de las correcciones atmosféricas, la aproximación polinómica del tiempo y las efemérides del satélite. Estos errores tienen una consideración no sistemática y se denominan de manera general como ruido interno de la observación.

Sabiendo además que  $(x^k, y^k, z^k)$  son las efemérides del satélite y  $(x, y, z)$  las coordenadas cartesianas geocéntricas de la estación, se puede definir la distancia geométrica real entre el satélite y el receptor  $\rho^k$  de la siguiente manera.

$$\rho^k(x, y, z) = \sqrt{(x^k - x)^2 + (y^k - y)^2 + (z^k - z)^2} \quad (6.2)$$

Teniendo en cuenta estas consideraciones en (6.1), las incógnitas se limitan a las coordenadas cartesianas de la estación  $(x, y, z)$  y al propio error  $dT$  del oscilador del receptor respecto al tiempo GPS, simplificando sustancialmente el modelo matemático:

$$p^k = \rho^k + c dT + D \quad (6.3)$$

$$p^k - D = \sqrt{(x^k - x)^2 + (y^k - y)^2 + (z^k - z)^2} + c dT \quad (6.4)$$

donde en el primer miembro de la ecuación (6.4) estarían las medidas de código  $p^k$  y todos los términos modelizados que se obtienen a partir de la expresión  $D = d_{trop} + d_{ion} - dt^k$  y, en el segundo miembro, los 4 parámetros desconocidos

$(x, y, z)$  y  $dT$ . La técnica usual de resolución de este posicionamiento se basa en la linealización de la distancia geométrica  $\rho^k$  de la ecuación (6.2), utilizando para ello una posición aproximada del receptor  $(x_o, y_o, z_o)$ .

$$\rho^k = \rho_o^k + \frac{\delta\rho^k(x, y, z)}{\delta x}dx + \frac{\delta\rho^k(x, y, z)}{\delta y}dy + \frac{\delta\rho^k(x, y, z)}{\delta z}dz \quad (6.5)$$

$$\rho^k = \rho_o^k + \frac{x_o - x^k}{\rho_o^k}dx + \frac{y_o - y^k}{\rho_o^k}dy + \frac{z_o - z^k}{\rho_o^k}dz \quad (6.6)$$

De este modo se puede aplicar un ajuste por mínimos cuadrados del modelo al sustituir (6.6) en (6.4) y reagrupando las incógnitas en el segundo miembro:

$$p^k - D - \rho_o^k = \frac{x_o - x^k}{\rho_o^k}dx + \frac{y_o - y^k}{\rho_o^k}dy + \frac{z_o - z^k}{\rho_o^k}dz + c dT \quad (6.7)$$

El hecho de presentar 4 incógnitas implica que para resolver este modelo de manera inmediata es suficiente plantear las ecuaciones de observación a cuatro satélites en cada época de manera simultánea, este proceso permite el cálculo de coordenadas en cada época y define el posicionamiento absoluto por código en cinemático, que es el que usualmente se utiliza en los receptores GPS de vehículos o navegación. En el caso de considerar un ajuste por mínimos cuadrados con más de cuatro observaciones se determina entonces un posicionamiento absoluto por código en estático, cuyo modelo matricial se aproxima a:

$$Y = GX \quad (6.8)$$

donde  $Y$  es el vector de residuos prefijados al modelo lineal, que contiene las desviaciones entre las pseudodistancias medidas y las predichas;  $G$  es la matriz de geometría satélite-receptor con los componentes  $\rho^k(x, y, z)$ ; y  $X$  es el vector que contiene las desviaciones entre las aproximaciones, las coordenadas reales y el offset del reloj del receptor  $(dx, dy, dz, dT)$ .

Una vez resuelto el modelo por mínimos cuadrados, las coordenadas del receptor se determinan sumando la tripleta  $(dx, dy, dz)$  a las coordenadas iniciales tomadas  $(x_o, y_o, z_o)$ .

$$\begin{aligned} x &= x_o + dx \\ y &= y_o + dy \\ z &= z_o + dz \end{aligned} \quad (6.9)$$

El posicionamiento por código tiene una precisión que está entre 5 y 10 metros cuando la disponibilidad selectiva está desactivada. Es la técnica más sencilla empleada por los receptores GNSS para proporcionar instantáneamente posición y tiempo al usuario con coordenadas absolutas en el sistema WGS84.

### 6.1.3. Posicionamiento absoluto por fase

También es posible obtener la pseudodistancia aplicando la ecuación de observación de las medidas de fase  $\Phi$  descrita en (6.1). Este procedimiento mejora sustancialmente la precisión respecto al posicionamiento absoluto por código pero tiene el inconveniente de la entrada en la solución de las ambigüedades asociadas a la observación de fase. Si se divide la ecuación (6.1) por la longitud de onda  $\lambda$  para un determinado satélite  $k$  se tendría:

$$\phi^k = \frac{1}{\lambda} \rho^k + f^k (dT - dt^k) + N^k + \frac{1}{\lambda} (d_{trop} - d_{ion} + \epsilon_\Phi) \quad (6.10)$$

Aplicando las mismas estimaciones que para el posicionamiento absoluto por código, se puede considerar  $d_{ion}$ ,  $d_{trop}$  y  $dt$  como datos modelizados y no como incógnitas del modelo, agrupándolos en un término general  $D = \frac{1}{\lambda} (d_{trop} - d_{ion} - dt^k)$ . El parámetro  $\epsilon_\Phi$ , por su parte, englobaría a los residuos del modelo. La ecuación simplificada, pasando las incógnitas al segundo miembro y teniendo en cuenta la expresión de  $\rho^k(x, y, z)$  de (6.2), quedaría:

$$\phi^k - D = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(x^k - x)^2 + (y^k - y)^2 + (z^k - z)^2} + f^k dT + N^k \quad (6.11)$$

En este caso, a diferencia del posicionamiento absoluto por código, se considera una quinta incógnita debido a las ambigüedades de fase  $N^k$ , que se suma a las coordenadas de la posición del receptor  $(x, y, z)$  y a la diferencia con el tiempo GPS del reloj del receptor  $dT$ .

Al igual que antes, para incluir la ecuación en un ajuste por mínimos cuadrados, es necesario linealizar  $\rho^k$  en (6.11), tal como viene descrito en (6.5) y (6.6). Aplicando estas premisas la expresión se define del siguiente modo:

$$\phi^k - D - \rho_o^k = \frac{1}{\lambda} \left( -\frac{x_o - x^k}{\rho_o^k} dx - \frac{y_o - y^k}{\rho_o^k} dy - \frac{z_o - z^k}{\rho_o^k} dz \right) + f^k dT + N^k \quad (6.12)$$

Si se observan 4 satélites en una época determinada, las incógnitas que resultan son las diferencias entre las coordenadas aproximadas y reales de la estación  $(dx, dy, dz)$ , las ambigüedades iniciales a los satélites  $(N^1, N^2, N^3, N^4)$  y la discrepancia con el tiempo GPS del reloj del receptor  $(dT)$ . En este caso no se puede resolver cada ecuación en su totalidad, ya que se dispone de 4 observaciones y 8 incógnitas.

Con 2 épocas se pasaría a 9 incógnitas con 8 observaciones, esto es debido a que cada época adicional incrementa el número de incógnitas con un nuevo término para el reloj del receptor  $(dT)$ . Es necesario, por tanto, 3 épocas de observación

para disponer así de 12 ecuaciones con 10 incógnitas, 3 para las coordenadas  $(dx, dy, dz)$ , 4 para las ambigüedades iniciales a los satélites  $(N^1, N^2, N^3, N^4)$  y 3 para las diferencias del reloj  $(dT^1, dT^2, dT^3)$ . Un mayor número de observaciones y satélites permite una redundancia que facilita la solución del modelo por mínimos cuadrados de manera satisfactoria.

De cualquier modo, este posicionamiento permite una solución con una sola época siempre y cuando no se consideren las ambigüedades. En este caso, una observación simultánea de más de 4 satélites y una inicialización estática previa para resolver las ambigüedades iniciales permite un posicionamiento cinemático por fase. Es importante destacar que una vez resueltas las ambigüedades iniciales no se puede perder la señal en todo el proceso de observación para evitar una nueva inicialización. En el caso de posicionamiento en estático, donde se requiere una determinación de ambigüedades, una observación de 4 satélites simultáneamente con un mínimo de 3 épocas permite unos resultados razonables.

#### 6.1.4. Posicionamiento relativo

En este tipo de posicionamiento se busca determinar las coordenadas de un punto desconocido con respecto a uno conocido mediante el vector o línea base que une a ambos. El objetivo final de esta metodología es reducir o eliminar las incógnitas que aparecen en la ecuación de fase (6.1), como son el offset del reloj del receptor y el satélite así como la ambigüedad inicial. De esta manera se mejora sustancialmente la precisión obtenida en el posicionamiento absoluto.

El posicionamiento relativo se basa en la construcción de diferencias entre las medidas realizadas en diferentes estaciones o de diferentes satélites en un mismo instante o en instantes sucesivos (Seeber, 2003). Estas diferencias se clasifican en simples, dobles y triples diferencias, dependiendo de si se considera uno o varios satélites y uno o varios instantes. Para el desarrollo geométrico se tendrá en cuenta la ecuación de fase (6.1), dividida por la longitud de onda  $\lambda$ , sin considerar los retardos troposféricos, ionosféricos y errores aleatorios  $d_{trop}$ ,  $d_{ion}$  y  $\epsilon_\Phi$ , que son modelizados o corregidos por la observación bifrecuencia.

$$\phi = \frac{1}{\lambda}\rho + f(dT - dt) + N \quad (6.13)$$

##### 6.1.4.1. Simples diferencias

Este modelo se puede plantear con observaciones entre varias estaciones a un mismo satélite y en un mismo instante. Se establece la diferencia mediante la observación simultánea de un mismo satélite  $k$  desde dos estaciones  $i$  y  $j$  en un

instante  $t$ . En la figura 6.1 se incluye un esquema básico de una observación para simples diferencias.

En este caso, las dos observaciones de fase a utilizar serían:

$$\begin{aligned}\phi_i^k(t) &= \frac{1}{\lambda}\rho_i^k + f^k(dT_i(t) - dt^k(t)) + N_i^k \\ \phi_j^k(t) &= \frac{1}{\lambda}\rho_j^k + f^k(dT_j(t) - dt^k(t)) + N_j^k\end{aligned}\quad (6.14)$$

y haciendo la diferencia entre ambas ecuaciones y reagrupando los términos

$$\phi_j^k(t) - \phi_i^k(t) = \frac{1}{\lambda}(\rho_j^k - \rho_i^k) + f^k(dT_j(t) - dT_i(t)) + (N_j^k - N_i^k) \quad (6.15)$$

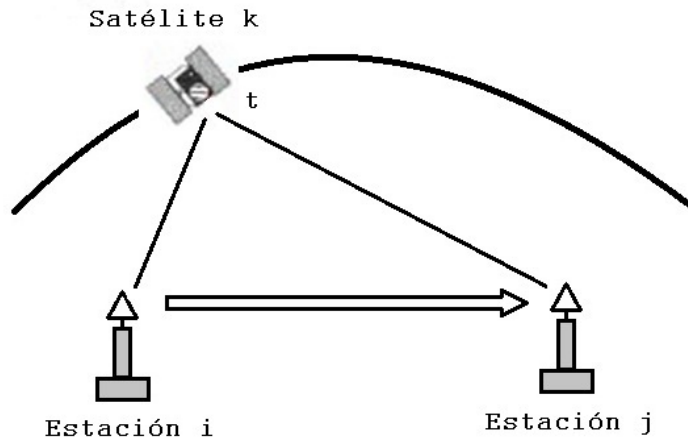


Figura 6.1: Simples diferencias de fase

Considerando las siguientes notaciones que se sustituyen en la ecuación (6.15), quedaría la expresión simplificada de las simples diferencias:

$$\begin{aligned}\phi_{i,j}^k(t) &= \phi_j^k(t) - \phi_i^k(t) & \rho_{i,j}^k(t) &= \rho_j^k(t) - \rho_i^k(t) \\ dT_{i,j}^k(t) &= dT_j^k(t) - dT_i^k(t) & N_{i,j}^k(t) &= N_j^k(t) - N_i^k(t)\end{aligned}\quad (6.16)$$

$$\phi_{i,j}^k(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{i,j}^k(t) + f^k dT_{i,j}^k(t) + N_{i,j}^k(t) \quad (6.17)$$

Este modelo sigue afectado por la diferencia de ambigüedad en el instante inicial entre ambas estaciones  $N_{i,j}^k$ , así como de la diferencia de los errores en los relojes de los receptores  $dT_{i,j}^k$ ; sin embargo elimina el error en el reloj del satélite con respecto al tiempo GPS ( $dt$ ). En caso de estaciones cercanas, las simples diferencias son válidas incluso para la corrección ionosférica y troposférica, evitando así la modelización de estos términos.

### 6.1.4.2. Dobles diferencias

Las dobles diferencias de fase consisten en una combinación de simples diferencias entre estaciones y satélites en un mismo instante de tiempo. Para ello se observan dos satélites  $k$  y  $l$  desde dos estaciones  $i$  y  $j$  en el mismo momento  $t$ , tal como se muestra en la figura 6.2.

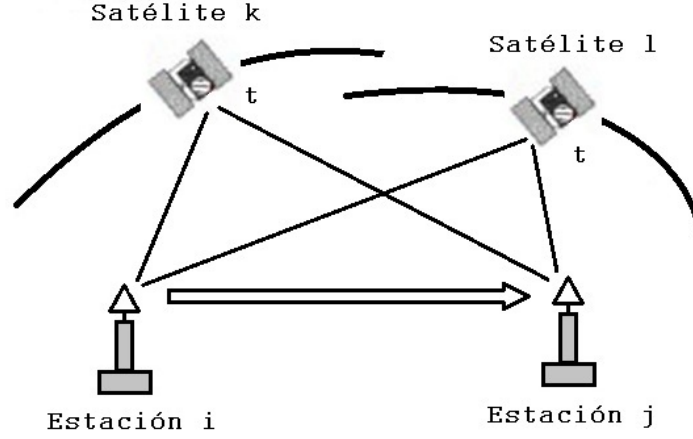


Figura 6.2: Dobles diferencias de fase

Partiendo de la ecuación de simples diferencias (6.17) se definen las siguientes expresiones iniciales:

$$\begin{aligned}\phi_{i,j}^k(t) &= \frac{1}{\lambda}\rho_{i,j}^k(t) + f^k dT_{i,j}^k(t) + N_{i,j}^k(t) \\ \phi_{i,j}^l(t) &= \frac{1}{\lambda}\rho_{i,j}^l(t) + f^l dT_{i,j}^l(t) + N_{i,j}^l(t)\end{aligned}\quad (6.18)$$

y haciendo la diferencia entre ambas y agrupando

$$\phi_{i,j}^l(t) - \phi_{i,j}^k(t) = \frac{1}{\lambda}(\rho_{i,j}^l(t) - \rho_{i,j}^k(t)) + (N_{i,j}^l(t) - N_{i,j}^k(t))\quad (6.19)$$

Atendiendo a la notación simplificada descrita a continuación, y teniendo en cuenta las siguientes consideraciones generales planteadas en las simples diferencias:

$$\begin{aligned}\phi_{i,j}^{k,l}(t) &= \phi_{i,j}^l(t) - \phi_{i,j}^k(t) & \phi_{i,j}^{k,l}(t) &= \phi_j^l(t) - \phi_j^k(t) - \phi_i^l(t) + \phi_i^k(t) \\ \rho_{i,j}^{k,l}(t) &= \rho_{i,j}^l(t) - \rho_{i,j}^k(t) & \rho_{i,j}^{k,l}(t) &= \rho_j^l(t) - \rho_j^k(t) - \rho_i^l(t) + \rho_i^k(t) \\ N_{i,j}^{k,l}(t) &= N_{i,j}^l(t) - N_{i,j}^k(t) & N_{i,j}^{k,l}(t) &= N_j^l(t) - N_j^k(t) - N_i^l(t) + N_i^k(t)\end{aligned}\quad (6.20)$$

la ecuación definitiva de dobles diferencias quedaría del siguiente modo:

$$\phi_{i,j}^{k,l}(t) = \frac{1}{\lambda}\rho_{i,j}^{k,l}(t) + N_{i,j}^{k,l}(t)\quad (6.21)$$

Con el uso de este modelo se eliminan los errores de los osciladores de ambos receptores respecto al tiempo GPS,  $dT$ ; quedando como incógnitas las ambigüedades iniciales en ambas estaciones  $N_{i,j}^{k,l}(t)$ .

### 6.1.4.3. Triples diferencias

Las triples diferencias surgen para resolver el problema de la ambigüedad inicial, planteando el uso de dos dobles diferencias entre dos estaciones ( $i$  y  $j$ ) y dos satélites ( $k$  y  $l$ ) para dos épocas distintas ( $t_1$  y  $t_2$ ), tal como se observa en la figura 6.3.

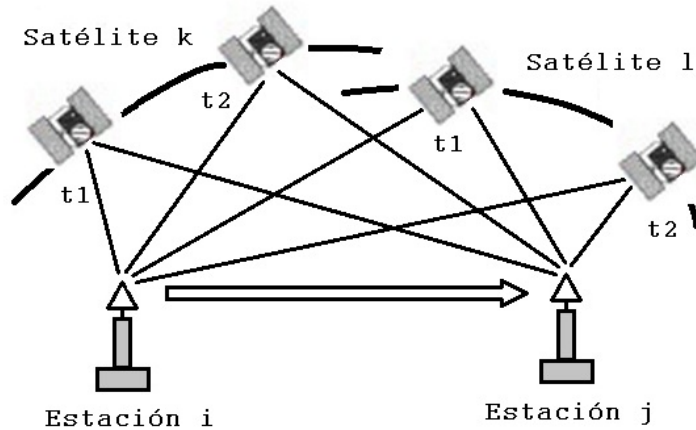


Figura 6.3: Triples diferencias de fase

Las dobles diferencias en los instantes  $t_1$  y  $t_2$  vendrían dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\phi_{i,j}^{k,l}(t_1) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^{k,l}(t_1) + N_{i,j}^{k,l}(t_1) \\ \phi_{i,j}^{k,l}(t_2) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^{k,l}(t_2) + N_{i,j}^{k,l}(t_2)\end{aligned}\quad (6.22)$$

Al realizar la diferencia en (6.22) desaparece la ambigüedad inicial entre los satélites  $N_{i,j}^{k,l}$ , quedando solo el observable pseudodistancia  $\rho_{i,j}^{k,l}$ .

$$\phi_{i,j}^{k,l}(t_2) - \phi_{i,j}^{k,l}(t_1) = \frac{1}{\lambda} (\rho_{i,j}^{k,l}(t_2) - \rho_{i,j}^{k,l}(t_1)) \quad (6.23)$$

Asumiendo la notación definida a continuación:

$$\begin{aligned}\phi_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) &= \phi_{i,j}^{k,l}(t_2) - \phi_{i,j}^{k,l}(t_1) \\ \rho_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) &= \rho_{i,j}^{k,l}(t_2) - \rho_{i,j}^{k,l}(t_1)\end{aligned}\quad (6.24)$$

las triples diferencias de fase se pueden expresar del siguiente modo:

$$\phi_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) = \frac{1}{\lambda} \rho_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) \quad (6.25)$$

donde las diferencias  $\phi_{i,j}^{k,l}(t_{1,2})$  y  $\rho_{i,j}^{k,l}(t_{1,2})$  quedarían:

$$\begin{aligned} \phi_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) = & \phi_j^l(t_2) - \phi_j^k(t_2) - \phi_i^l(t_2) + \phi_i^k(t_2) - \\ & - \phi_j^l(t_1) - \phi_j^k(t_1) - \phi_i^l(t_1) + \phi_i^k(t_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{i,j}^{k,l}(t_{1,2}) = & \rho_j^l(t_2) - \rho_j^k(t_2) - \rho_i^l(t_2) + \rho_i^k(t_2) - \\ & - \rho_j^l(t_1) - \rho_j^k(t_1) - \rho_i^l(t_1) + \rho_i^k(t_1) \end{aligned}$$

En este caso, la gran ventaja de las triples diferencias es que eliminan las ambigüedades iniciales al utilizar dos instantes diferentes al mismo satélite sin pérdida de ciclos  $N_{i,j}^{k,l}(t_2) - N_{i,j}^{k,l}(t_1)$ . Es importante que la observación sea continuada para garantizar esta corrección ya que una pérdida de ciclos implica una nueva inicialización del proceso.

## 6.2. Posicionamiento Puntual de Precisión (PPP)

El Posicionamiento Puntual de Precisión (PPP) es una metodología que permite determinar la posición precisa a partir de las observaciones de un receptor GPS aislado (Lachapelle et ál., 2006). En este caso no se aplican las diferencias propias de las técnicas relativas, ya que solo se consideran las correcciones al oscilador del satélite y sus efemérides orbitales como dato conocido en el cálculo (Hugentobler et ál., 2006), el uso de combinaciones lineales de frecuencias para corregir el retardo ionosférico, así como información precisa sobre la orientación de la Tierra, mareas y carga oceánica. Los inicios de esta técnica se remontan a los trabajos desarrollados en Anderle (1976), aunque no fue hasta finales de 1990 cuando se investigó rigurosamente en Zumberge et ál. (1997a) en base a las ecuaciones de observación iniciales del posicionamiento GPS.

Los parámetros que se calculan en un posicionamiento PPP son, por un lado, la corrección del reloj de la estación, las coordenadas de la misma y los parámetros de troposfera. Para poder modelizar los distintos datos de entrada en PPP, IGS comenzó a proveer ficheros de órbitas precisas y datos de reloj de satélites a finales de la década de 1990 que eran necesarios para poder definir un posicionamiento preciso con ciertas garantías (Andrei et ál., 2010; Kouba, 2009). En líneas generales, esta metodología es capaz de alcanzar con los productos adecuados una precisión que ronda el nivel centimétrico (Lachapelle et ál., 2006).

Puesto que PPP es una técnica en el que no participa un ajuste de red, el datum geodésico no es definido por el contrañimiento sobre estaciones de referencia, sino que es aportado a partir de la información facilitada por las órbitas y el

reloj del satélite (Zumberge et ál., 1997a). La calidad de los datos de entrada de órbitas, reloj y EOP es de gran importancia para alcanzar una alta precisión en el posicionamiento, puesto que el error en estos datos se propaga directamente a los resultados. Es necesario también el uso de la información disponible a partir de la misma fuente o institución de cálculo, ya que la mezcla de órbitas y relojes de diferentes Centros de Análisis degradaría los resultados del posicionamiento.

Al no requerirse una estación base, el PPP elimina los inconvenientes del procesado diferencial haciendo que sea una técnica más simple y viable con los productos adecuados (Kouba y Heroux, 2001; Zumberge et ál., 1997a). Sin embargo, no es posible alcanzar las precisiones que se pueden conseguir en los análisis de redes geodésicas. Esto es debido principalmente a dos hechos destacados: En primer lugar por la imposibilidad de resolver las ambigüedades de fase y las correlaciones entre las correcciones de reloj y las estaciones en relativo. En segundo lugar hay que tener en cuenta que en una solución de red todos los parámetros son estimados para ajustarse lo mejor posible a los datos de observación disponibles. Esto no es aplicable en PPP, donde no existen medidas conjuntas de las estaciones al tratarse de un receptor aislado.

Como consecuencia de ello, y en particular para redes locales y regionales, las pequeñas deficiencias en las estimaciones del modelizado de troposfera y otros parámetros que podían ser absorbidos en los relojes de los satélites estimados en dobles diferencias, no puede ser utilizado en el caso del PPP que procesa la señal individualmente para cada estación (Hugentobler et ál., 2006).

En ciertas ocasiones la no existencia de correlaciones en PPP sería deseable para la detección de problemas en la estación, movimientos propios individuales y determinación de órbitas de satélites donde la correlaciones no es un efecto deseado en la determinación de los parámetros. Estos errores o diferencias no serían diseminadas a través de la totalidad de una red geodésica, influyendo únicamente en los resultados de la estación de manera individual. Esta propiedad, que a priori se puede considerar como una desventaja, es uno de los puntos fuertes de esta técnica.

Las aplicaciones del PPP son numerosas, el hecho de un posicionamiento absoluto sin ninguna estación de referencia reduce la carga de cálculo y los costos de financiación por el uso de redes para dobles diferencias. Las principales aplicaciones prácticas incluyen el estudio de la deformación cortical, el posicionamiento de satélites tipo LEO, la meteorología con el uso de modelos troposféricos en base a los datos GPS y la navegación aérea y terrestre (Kouba, 2009).

### 6.2.1. Modelo matemático

Para el desarrollo matemático del PPP es necesario partir de las ecuaciones de observación (6.1) con las siguientes consideraciones:

- El efecto troposférico  $d_{trop}$  se considera como el efecto de la parte neutral no ionizada de la atmósfera que no dependería de la frecuencia. Este efecto es el mismo para las medidas de código y fase.
- El efecto ionosférico  $d_{ion}$  es dependiente de la frecuencia y en una primera aproximación, tal como viene descrito en la ecuación (5.41), se puede considerar el primer orden de desarrollo de la siguiente expresión:

$$d_{ion,f} = \frac{40,3}{f^2} TEC = \frac{40,3}{f^2} 10^{16} \text{ electrones}/m^2 \quad (6.26)$$

- Se añade un parámetro correspondiente al efecto multipath para código y fase  $m_{p,f}$  y  $m_{\Phi,f}$  según la frecuencia considerada.
- Los errores aleatorios, calculados como ruido para el código y la fase en cada frecuencia, se tendrán en cuenta como  $\epsilon_{p,f}$  y  $\epsilon_{\Phi,f}$ .

Aplicando estas premisas en (6.1), y teniendo en cuenta los observables de código y fase para una frecuencia  $f = 1, 2$ , un satélite  $k$  y un receptor  $i$  determinado, se tendrían las expresiones generales:

$$\begin{aligned} p_{f,i}^k &= \rho_i^k + c(dT_i - dt^k) + d_{ion,f,i}^k + d_{trop,i}^k + \epsilon_{p,f}^k \\ \Phi_{f,i}^k &= \rho_i^k + c(dT_i - dt^k) - d_{ion,f,i}^k + d_{trop,i}^k + \lambda_f N_{f,i}^k + \epsilon_{\Phi,f}^k \end{aligned} \quad (6.27)$$

Para completar las ecuaciones de observación es necesario incluir los términos de tendencias de código DCB y de fase correspondientes al satélite y al receptor. Respecto a la notación, el observable de código se denominará  $b_f$ , mientras que la de fase se corresponderá con  $B_f$ . El comportamiento de estas tendencias es distinto según el observable que se considere. En el caso del código para el satélite, las DCB serían términos conocidos y facilitados por el servicio CODE. Las tendencias de fase por el contrario no son conocidas, participando directamente en el cálculo de ambigüedades. Estas últimas se conocen como *Fractional-Cycle Biases*, o FCB, que al tratarse de términos no modelizados son la base de la resolución de ambigüedades en la metodología PPP. Los FCB complementarían a las ambigüedades enteras  $N_{f,i}^k$  en el observable de fase como una parte fraccional.

Teniendo en cuenta estas consideraciones en (6.27), las ecuaciones de observación para el modelo matemático del PPP quedarían del siguiente modo:

$$\begin{aligned} p_{f,i}^k &= \rho_i^k + c(dT_i - dt^k) + d_{ion,f,i}^k + d_{trop,i}^k + (b_{f,i} - b_f^k) + \epsilon_{p,f}^k \\ \Phi_{f,i}^k &= \rho_i^k + c(dT_i - dt^k) - d_{ion,f,i}^k + d_{trop,i}^k + \lambda_f B_{f,i}^k + \epsilon_{\Phi,f}^k \end{aligned} \quad (6.28)$$

siendo

$$B_{f,i}^k = N_{f,i}^k + B_{f,i} - B_f^k \quad (6.29)$$

Para un mejor tratamiento de la señal, y a fin de resolver problemas en la observación como saltos de ciclo, ionosfera y geometría de satélites; en base a las ecuaciones principales (6.28) se pueden considerar una serie de combinaciones lineales de las observaciones de código y fase.

**6.2.1.1. Combinación libre de ionosfera**

La combinación libre de ionosfera permite eliminar el retardo ionosférico de primer orden que depende de la inversa del cuadrado de la frecuencia. Su expresión matemática sería:

$$p_{PC} = \frac{f_1^2 p_1 - f_2^2 p_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad \Phi_{LC} = \frac{f_1^2 \Phi_1 - f_2^2 \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (6.30)$$

Esta combinación lineal es el método más eficiente y preciso para eliminar el efecto ionosférico sobre la señal GPS y se recomienda aplicar en PPP y en modo diferencial con líneas base de longitud superior a los 10 kilómetros (Zumberge et ál., 1997a). Usualmente la aplicación de esta combinación lineal resulta una señal denominada *L3* que posee ya la corrección ionosférica (Seeber, 2003).

**6.2.1.2. Combinación libre de geometría**

El objetivo de esta combinación es cancelar la parte geométrica de la medida, no afectando a los efectos dependientes de la frecuencia, como el retardo ionosférico, los retardos instrumentales, el efecto wind-up, el multipath y el ruido (Blewitt, 1989). Su expresión genérica para ambos observables viene definida del siguiente modo:

$$p_{PI} = p_1 - p_2 \quad \Phi_{LI} = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (6.31)$$

Esta combinación se suele utilizar para estimar el TEC en los modelos ionosféricos, detectar saltos de ciclo en la fase de la portadora y para estimar rotaciones en la antena del satélite.

**6.2.1.3. Combinación Wide-Lane (WL) o banda ancha**

La combinación WL tiene como objetivo crear una señal alternativa con una longitud de onda significativamente más ancha que las originales. Esta mayor magnitud de la longitud de onda es útil para la detección de los saltos de ciclo y el fijado de ambigüedades. Su expresión para código y fase sería la siguiente:

$$p_{PW} = \frac{f_1 p_1 - f_2 p_2}{f_1 - f_2} \quad \Phi_{LW} = \frac{f_1 \Phi_1 - f_2 \Phi_2}{f_1 - f_2} \quad (6.32)$$

Otra característica de esta combinación es el cambio de signo en el término ionosférico, el cual es aprovechado por la combinación Melbourne-Wübbena para eliminar la refracción ionosférica.

#### 6.2.1.4. Combinación Narrow-Lane (NL) o banda estrecha

En este caso se crea una nueva señal con una longitud de onda más estrecha que la original, permitiendo de este modo un menor ruido que considerando cada componente por separado.

$$p_{PN} = \frac{f_1 p_1 + f_2 p_2}{f_1 + f_2} \quad \Phi_{LN} = \frac{f_1 \Phi_1 + f_2 \Phi_2}{f_1 + f_2} \quad (6.33)$$

Una de sus principales ventajas de esta combinación es que reduce el ruido presente en el observable de código en la combinación Melbourne-Wübbena, utilizándose para estimar la ambigüedad de tipo WL.

#### 6.2.1.5. Combinación Melbourne-Wübbena (MW)

Esta combinación, descrita en [Melbourne \(1985\)](#) y [Wübbena \(1985\)](#) para la frecuencia L6, utiliza conjuntamente los observables de código y fase y las combinaciones WL y NL, eliminando de este modo el efecto ionosférico, la geometría, osciladores y troposfera. Estaría definida por las siguientes ecuaciones:

$$\Phi_{L6} = \Phi_{LW} - p_{PN} \quad (6.34)$$

$$\Phi_{L6} = \frac{f_1 \Phi_1 - f_2 \Phi_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 p_1 + f_2 p_2}{f_1 + f_2} \quad (6.35)$$

Al participar tanto las combinaciones WL y NL, la combinación MW permite un doble beneficio, por un lado la combinación WL tiene una longitud de onda mayor que la señal individual, lo que crea un aumento en el espaciado de las ambigüedades. Por otro lado, el ruido medido se reduce por la combinación NL en las observaciones de código, reduciendo la dispersión de valores alrededor de la verdadera tendencia ([Blewitt, 1990](#)).

Esta combinación, junto a la de ionosfera libre anteriormente descrita, es utilizada en PPP para corregir y mejorar el tratamiento de la señal, así como para la estimación de las FCB y ambigüedades enteras en la solución del posicionamiento.

### 6.2.2. Solución de ambigüedades

No cabe duda de que la resolución de ambigüedades es el aspecto más importante a la hora de implementar un posicionamiento puntual de precisión, ya que no se conoce la fase inicial entre el satélite y el receptor ([Andrei et ál., 2010](#); [Van](#)

Melle, 2008). En los métodos diferenciales se han desarrollado multitud de procedimientos para solventar esta problemática fijando las ambigüedades enteras, ya que la parte fraccional quedaba superada en el cálculo diferencial. Para ello se utilizaron las combinaciones lineales como apoyo para aplicar diversas técnicas. En Mervart (1995) vienen descritas los procedimientos más usuales.

Los primeros trabajos desarrollados para resolver ambigüedades sin utilizar el posicionamiento relativo se iniciaron en Blewitt (1989), donde se planteó un método que no era sensible al efecto ionosférico para resolver así las ambigüedades de la fase de la portadora en líneas base de longitud superior a 2000 kilómetros. Debido a la longitud de la base línea, para resolver las ambigüedades se utilizó una combinación MW (Melbourne, 1985; Wübbena, 1985) para señales registradas con receptores doble frecuencia. También se incluyó un método para aplicar constreñimientos ionosféricos al procesado.

En base a este trabajo, tradicionalmente se han utilizado dos modelos matemáticos en observaciones bifrecuencia para el cálculo de ambigüedades en PPP. El primero, descrito en Kouba y Heroux (2001), utiliza las observaciones de combinación lineal libre de ionosfera de código y fase. En esta solución no se pueden plantear ambigüedades enteras fijas sino solo soluciones flotantes. El segundo modelo, desarrollado en Gao y Shen (2002), utiliza un modelo de observaciones diferente basado en el mismo principio de Kouba y Heroux (2001). En este caso se promedian las medidas de código y fase reduciendo el ruido que aparece en las pseudodistancias de código. Al igual que el primer modelo, el segundo no puede resolver las ambigüedades enteras.

En todos estos casos se observa que la solución de ambigüedades en PPP plantea siempre una resolución parcial con valores flotantes, ya que la metodología intrínsecamente dificulta la solución de las ambigüedades enteras. Esto en esencia provoca unos tiempos de observación largos para alcanzar la convergencia, superiores a los 20 minutos, pero permite un cálculo satisfactorio en el nivel del centímetro de precisión en el posicionamiento absoluto.

La transición de una solución de ambigüedades flotantes a enteras en PPP es una de las ramas de investigación más activas en la actualidad, ya que abre la puerta al posicionamiento cinemático con esta técnica. Hasta 2007 el planteamiento se fue abriendo paso a partir de varios métodos que estudiaban las distintas formas de fijar y resolver este tipo de ambigüedades. En general, estos modelos se pueden agrupar en cuatro grandes líneas de investigación (Zhang y Li, 2013):

- Los que se centran en el proceso de estimación de las *Fractional Cycle Biases* (FCB) que se encuentran presentes en todas las estimaciones de ambigüedades. En este campo se pueden resaltar los trabajos presentados por Geng et ál. (2008); Mervart et ál. (2008) y Ge et ál. (2008).

- Los que estudian el método de estimación de los parámetros enteros del reloj (*Integer Recovery-Clock*, IRC) para absorber los FCB. Esta línea ha sido desarrollada principalmente por [Laurichesse et ál. \(2009\)](#); [Van Melle \(2008\)](#) y [Delporte et ál. \(2008\)](#)
- Los centrados en el método *Decoupled clock model* de [Collins et ál. \(2008a,b\)](#) y [Collins y Bisnath \(2011\)](#) que viene a ser una generalización del método IRC anterior.
- Y los que estiman las ambigüedades a partir de las generadas por la solución de una red global PPP. Éste método es el utilizado por el software GIPSY-OASIS ([Bertiger et ál., 2010](#)) y es en esencia un fijado a enteros de las ambigüedades dobles diferencias.

Todos estos procesos parten de la base de que el problema de la resolución de ambigüedades totales (*Full Ambiguity Resolution*, FAR) no es siempre posible en PPP, por lo que se busca la forma de una solución de parte de las ambigüedades conocido como Resolución de Ambigüedades Parciales (*Partial Ambiguity Resolution*, PAR) ([Teunissen y Verhagen, 2008](#)). El objetivo de esta resolución parcial es identificar el conjunto de ambigüedades que da la mayor probabilidad de corregir las estimaciones enteras, a fin de acercarse a una resolución total.

### 6.2.2.1. Estimación de las FCB

Esta metodología de solución de ambigüedades, propuesta por [Ge et ál. \(2008\)](#), involucra una combinación libre de ionosfera sobre la observación y una descomposición de las tendencias de fase del receptor  $b_{ck}^i$  en dos partes, *Wide-lane* ( $b_{wk}^i$ ) y *Narrow-lane* ( $b_{nk}^i$ ). Esto elimina los FCBs dependientes del receptor aplicando la simples diferencias entre los satélites observados.

$$b_{ck}^i = \frac{f_1}{f_1 + f_2} b_{nk}^i + \frac{f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} b_{wk}^i \quad (6.36)$$

Para determinar la parte *wide-lane* de los FCBs utilizan una red de estaciones CORS promediando las partes fraccionales de la estimación de la ambigüedades *wide-lane* derivadas de una combinación de medidas MW. Por su parte, las FCBs *narrow-lane* se determinan promediando las partes fraccionales de todas las estimaciones *narrow-lane* derivadas de las ambigüedades *wide-lane* y de las ambigüedades libres de ionosfera. Una vez determinadas ambas FCBs, éstas se utilizan para corregir la estimación de ambigüedades permitiendo una resolución de ambigüedades enteras.

Una característica importante de este proceso es que se considera que estas FCB son dependientes del receptor y de los satélites, estando presentes en todas

las observaciones (Geng et ál., 2010b). Sin embargo no se conocen exactamente las propiedades temporales que tienen estos FCBs ya que su componente estable en el tiempo no puede ser separada de la estimación de ambigüedades en PPP (Geng et ál., 2010a; Zumberge et ál., 1997b).

Esta aproximación difiere de los métodos convencionales en PPP, donde las ambigüedades no se fijan a valores enteros sino que convergen a una solución flotante de ambigüedades en base a las FCBs.

#### 6.2.2.2. Integer Recovery-Clock

Laurichesse et ál. (2009) utilizaron un proceso similar al descrito en Ge et ál. (2008), incluyendo la misma descomposición en tendencias de fase *narrow lane* y *wide lane*. La principal diferencia en este caso es que las ambigüedades no diferenciales son directamente fijadas a enteras.

El método asigna un valor arbitrario a las FCBs de un receptor para obtener las FCBs específicas del satélite. La determinación de la FCB *wide lane* en este método es similar a la definida en Ge et ál. (2008), mientras que las *narrow lane* son fijadas sobre una red de estaciones CORS.

Laurichesse et ál. (2009) concluyeron que las fases enteras de los osciladores podían ser usadas por cualquier receptor en el área alrededor de la red CORS con una variación de la precisión, pudiendo alcanzarse incluso un posicionamiento cinemático absoluto con una precisión de unos 2 centímetros. Sin embargo, la inicialización para la resolución de ambigüedades en el receptor del usuario puede ser de hasta una hora, siendo éste el principal problema del método.

De hecho, una configuración de receptor estático con posición desconocida aporta una solución de la ambigüedad inicial del 88 % en los primeros 45 minutos y del 91 % a los 60. En el caso de un receptor cinemático es necesaria una observación de 90 minutos para que la ambigüedad inicial se corrija en un 81 %. La principal diferencia entre los métodos descritos por Ge et ál. (2008) y Laurichesse et ál. (2009) es como son separadas las FCB *narrow lane* de las ambigüedades enteras, ya que en el primer caso estas FCBs se determinan utilizando una estimación flotante de ambigüedades, mientras que en el segundo los FCBs son incluidos en la estimación del reloj.

Para comprobar la calidad de ambas metodologías, Geng et ál. (2010b) compararon estos dos modelos en función del error medio cuadrático de los residuos obtenidos de la posición estimada mediante ambigüedad flotante diaria y ambigüedad fija, todo ello respecto a una solución semanal IGS de 350 estaciones en el año 2008. Los resultados mostraron que las diferencias entre ambos métodos eran mínimas con valores de 2-3 milímetros en la componente horizontal y 6 milímetros en la vertical.

### 6.2.2.3. Decoupled Clock Model

Un método similar al aportado por [Laurichesse et ál. \(2009\)](#) fue el desarrollado por [Collins et ál. \(2008b\)](#) denominado *decoupled clock model* o modelo separado de reloj. En este caso, las medidas de fase de la portadora y pseudodistancia en doble frecuencia intervienen de manera separada para calcular los parámetros del oscilador. Los errores obtenidos a partir de las estimaciones del reloj mediante medidas de fase tienen una tendencia aleatoria respecto a las estimaciones con pseudodistancia. Además, los parámetros de la ambigüedad están constreñidos para considerarlos como valores enteros. Para calcular estos osciladores mediante código y fase se requiere también del uso de una red CORS de apoyo para generar los parámetros fijos.

[Collins et ál. \(2008a\)](#) demostraron que utilizando este método para procesar datos de 5 minutos sobre 24 horas, se alcanzaba solo una pequeña mejora en el posicionamiento, sin embargo, existía una apreciable reducción en el tiempo de convergencia. Con datos estáticos a 30 segundos después de 60 minutos de observación en datos horarios, el 90% de las soluciones se aproximaba a los 2 centímetros de error horizontal comparado con los 10 centímetros del PPP estándar ([Collins et ál., 2008b](#)). Estos resultados marcan una metodología viable en PPP para futuros desarrollos en tiempo real.

### 6.2.2.4. Estimación de ambigüedades en GIPSY-OASIS

En paralelo con estas técnicas, [Bertiger et ál. \(2010\)](#) presentaron un algoritmo de resolución de ambigüedades asociado al software GIPSY-OASIS que mejora la precisión de la solución para un receptor aislado definido en el original de [Blewitt \(1989\)](#). Este método procesa datos GPS en doble frecuencia de un receptor aislado junto a la estimación WL y las tendencias de fase desde una red global de receptores GPS. La diferencia con las técnicas anteriores radica en que esta red se utiliza además para generar las órbitas y las correcciones del oscilador para los mismos satélites GPS que luego participan en el procesado. En esencia lo que se plantea es un fijado de las ambigüedades dobles diferencias como valores enteros ([Geng et ál., 2012](#)).

Este algoritmo constriñe las combinaciones lineales de las tendencias de fase para así mejorar la compatibilidad con las tendencias globales estimadas. En este caso, no serían necesarios los datos de otro receptor. El procedimiento puntual estático es similar al definido en su origen por [Zumberge et ál. \(1997a\)](#), con la diferencia de que en este caso se tendrían unos modelos más actualizados con el uso de un software automático. Los parámetros de reloj y troposfera utilizados en GIPSY-OASIS son actualizados cada 5 minutos y los datos GPS tendrían un muestreo cada 300 segundos ([Bertiger et ál., 2010](#)).

Con la aplicación de esta metodología, los productos generados para el procesamiento incluyen el registro de las estimaciones de las WL y tendencias de fase desde la red global de estaciones GPS, mejorando por tanto la precisión alcanzada hasta el nivel del centímetro.

La tendencia general de los procedimientos anteriormente descritos es la introducción de las redes CORS como apoyo a las soluciones de ambigüedades PPP (Janssen et ál., 2013). La posibilidad de plantear soluciones enteras en base a las observaciones de la propia red permite el uso de estos datos para el posicionamiento de receptores aislados. Una solución de ambigüedades de este tipo reduce el tiempo de observación necesario para alcanzar una precisión adecuada y se muestra como una línea de investigación para las aplicaciones PPP en tiempo real.

### 6.2.3. Estimación de parámetros

La estimación de parámetros en PPP se basa en la modelización de las ecuaciones expresadas en (6.28) en función de unos parámetros  $F(x)$ , a lo que se añade un ruido de los datos  $\gamma$  y un error debido al modelizado  $\eta$ .

$$z = F(x) + \gamma + \eta \quad (6.37)$$

Puesto que la función  $F(x)$  no es lineal, se utiliza una expansión de Taylor en la ecuación (6.37):

$$z = F(x) \approx F'(x_o)(x - x_o) + F(x_o) \quad (6.38)$$

De manera general la ecuación (6.38) puede ser expresada como:

$$\delta z = A\delta x \quad (6.39)$$

donde:

$$\begin{aligned} \delta z &= z - F(x_o) \\ A &= F'(x_o) \\ \delta x &= (x - x_o) \end{aligned} \quad (6.40)$$

De este modo,  $x_o$  corresponde a los valores nominales de los parámetros del modelo y  $A$  su matriz de diseño. En el procesamiento PPP se busca encontrar la mejor solución a la ecuación (6.39) con los valores de  $x$  más ajustados. Los valores óptimos se definen como aquellos que tienen un mejor acuerdo entre el modelo y las observaciones, utilizando para ello un ajuste por mínimos cuadrados. Esto

significa que para encontrar los valores de  $x$  es necesario minimizar la siguiente expresión (Gregorius, 1996):

$$\chi^2 = (A\delta x - \delta z)^T V^{-1} (A\delta x - \delta z) + \delta x^T V^{-1} \delta x^T \quad (6.41)$$

donde  $V$  es la matriz de ruido de los datos,  $\delta x$  es la estimación y  $\delta z$  son los residuos prefijados.

Para obtener la solución con los valores de  $x$  es necesario que la derivada parcial de la ecuación (6.41) respecto a  $x$  sea igual a 0 para hacer la minimización:

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial x} = 0 \quad (6.42)$$

$$x^* = x_o + (A^T V^{-1} A + W^{-1})^{-1} A^T V^{-1} \delta z \quad (6.43)$$

La expresión (6.43) es análoga a la solución clásica mínimos cuadrados del tipo  $x = (A^T P A)^{-1} A^T P t$  y en ella se destaca  $W$  como la matriz de incertidumbres a priori de los parámetros del modelo y  $x^*$  como los parámetros estimados. Los residuos quedan definidos de la siguiente forma (Gregorius, 1996):

$$\delta z^* = z - F(x^*) \quad (6.44)$$

Finalmente, la expresión de la matriz  $W^*$ , como matriz de incertidumbres de los parámetros estimados  $x^*$  se calcularía con la ecuación:

$$W^* = (A^T V^{-1} A + W^{-1})^{-1} \quad (6.45)$$

Aunque las ecuaciones normales mencionadas son matemáticamente rigurosas, existe una inestabilidad y complejidad de cálculo cuando son insertadas en un proceso numérico (Gregorius, 1996). Los programas de procesado PPP suelen utilizar filtros que estabilizan el cálculo numérico y lo hacen más eficiente, dando los mismos resultados que resolviendo analíticamente las ecuaciones anteriores.

### 6.3. Programas de procesado PPP

Hasta la fecha, los dos programas con mayor difusión a la hora del procesado de la señal GPS con PPP son el GIPSY-OASIS (GOA) (Zumberge et ál., 1997a) y el Bernese 5.0 (BSW) (Hugentobler et ál., 2006). Ambos tienen aplicaciones y módulos específicos para la solución PPP mediante algoritmos de solución de ambigüedades y la obtención de coordenadas precisas de manera automática.

Junto a estos programas también se han desarrollado diversas aplicaciones online que, apoyados en aplicaciones PPP diversas, obtienen coordenadas y resultados mediante el envío de las observaciones por internet. Entre ellas destacan APPS, CSRS-PPP, GAPS y MagicGNSS.

### 6.3.1. GIPSY-OASIS

El programa GIPSY-OASIS (*GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software*), conocido comunmente como (GOA) y accesible en la web <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>, es un paquete de posicionamiento GNSS, simulación y análisis de órbitas desarrollado por el JPL a inicios de la década de 1980. Su desarrollo se basa en más de 25 años de experiencia con el análisis de datos GPS del JPL que inició sus trabajos con la determinación de órbitas precisas en la misión altimétrica de satélites Topex/Poseidon. El software está compuesto por una serie de programas y scripts coordinados mediante aplicaciones ejecutables bajo línea de comandos que desarrollan todas las funcionalidades del software (Figura 6.4). La versión más actualizada es la v6.2, lanzada en marzo de 2013.

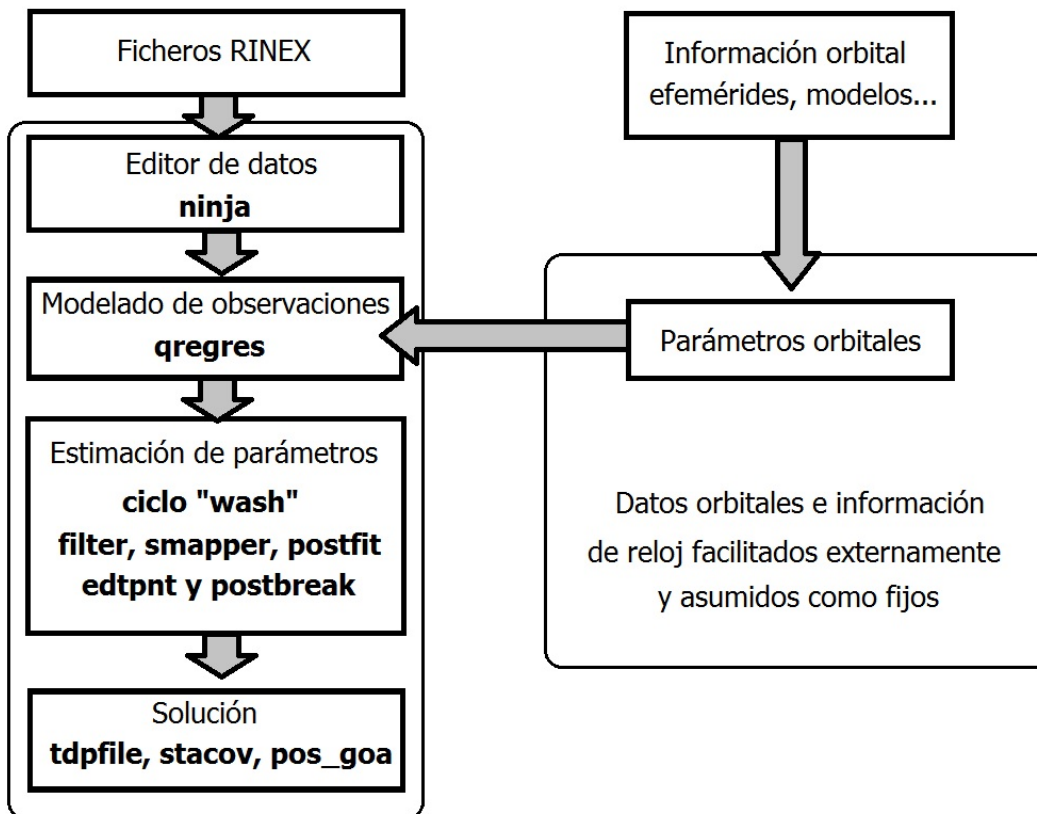


Figura 6.4: Diagrama de flujo de las aplicaciones en GIPSY-OASIS 6.2 y sus capacidades. Fuente Gregorius (1996)

Entre sus múltiples capacidades están la determinación de velocidades y posición de órbitas y estaciones terrestres (estáticas o en movimiento), el análisis de los datos de los sistemas GNSS tales como GPS y GLONASS, la gestión de

datos DORIS y SLR, la determinación del estado de osciladores para plataformas espaciales de órbita baja como LEO y el estudio del retardo troposférico zenital (ZPD) con sus gradientes.

El software GIPSY-OASIS trabaja en base LINUX, pudiendo ser ejecutado en distintas plataformas libres como Red Hat, Ubuntu o Fedora. Respecto al hardware, el software requiere de un mínimo de 2GB de memoria RAM. Solidariamente con el sistema operativo LINUX, es necesario que estén instalados además programas de compilación de los scripts del programa. Entre ellos se recomiendan: Perl 5.8.8 o superior, Python 2.4.1 o superior, Numpy 1.3.0, Tcsh 6.12, Gnuplot 4.0 y Ncompress 4.2.4, siendo compatibles versiones superiores. Para la gestión de los ficheros RINEX, el manual recomienda la versión más actualizada de la aplicación teqc de UNAVCO.

El programa se fundamenta en dos carpetas con información diferenciada: `\GOA` y `\GOA_VAR`, la primera con el código fuente y la segunda con las variables que participan en el procesado. En concreto, la carpeta `\GOA` contiene la información básica del código fuente de más de 200 programas que participan en el procesado PPP. Además dispone de unas bibliotecas compiladas y otras relacionadas con el código en perl, que permiten a GIPSY-OASIS interpretar de manera automatizada todo el proceso. Como aspecto importante, resaltar que el software dispone de una aplicación que permite la actualización directa de los datos contenidos en la carpeta de variables.

Respecto a la carpeta `\GOA_VAR`, ésta cuenta a su vez con varias subcarpetas donde se almacenan ficheros con información de procesado como son los datos de calibración de antena, los ficheros ANTEX de IGS, los datos de marea oceánica y terrestre, las tendencias de código, los datos de viraje de satélites GPS y GLONASS, las tablas de flujo atmosférico, los *leap seconds* y las tablas de orientación terrestre. Una de las subcarpetas, que debe ser editada directamente por el usuario en el momento del procesado, es la denominada `\GOA_VAR\sta_info`. Esta carpeta contiene los siguientes ficheros destacados:

- `\sta_id` Con el nombre y la descripción de las estaciones que participan en el procesado.
- `\sta_pos` Con las coordenadas cartesianas aproximadas y desviaciones asociadas de las estaciones a una época de referencia.
- `\sta_svec` Con la antena y sus respectivos offsets para cada estación a la época de referencia.
- `\ocnld_coeff_cm_fes04` Con los datos de carga oceánica de las estaciones que participan. Esta información viene facilitada por la página web del observatorio de Onsala <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>.

Fichero descargado	Descripción
YYYY-MM-DD.pos.gz	Órbitas de todos los satélites.
YYYY-MM-DD.tdp.gz	Ficheros de reloj a 5 minutos de todos los satélites.
YYYY-MM-DD.eo.gz	Parámetros de orientación de la Tierra.
YYYY-MM-DD.shad.gz	Eventos de sombra registrados.
YYYY-MM-DD.ant.gz	Ficheros de calibración de antena para el receptor y el transmisor utilizados para generar los productos de órbitas y reloj.
YYYY-MM-DD.wlpb.gz	Tendencias WL y de fase.
YYYY-MM-DD.frame.gz	Definición del marco en el que se distribuyen las órbitas.
YYYY-MM-DD_nf.tdp.gz	Ficheros de reloj a 5 minutos de todos los satélites para solución fiducial libre.
YYYY-MM-DD_nf.eo.gz	Parámetros de orientación de la Tierra para solución fiducial libre.
YYYY-MM-DD_nf.wlpb.gz	Tendencias WL y de fase para solución fiducial libre.
YYYY-MM-DD.x.gz	Fichero que provee de los 7 parámetros de transformación para convertir la solución fiducial libre en el marco definido por el fichero .frame.
YYYY-MM-DD_hr.tdp.gz	Ficheros de reloj a 30 segundos de todos los satélites.
YYYY-MM-DD_nf_hr.tdp.gz	Ficheros de reloj a 30 segundos de todos los satélites para solución fiducial libre.

Tabla 6.1: Ficheros descargados por el programa GIPSY-OASIS, se muestra una descripción del mismo y la extensión. El código del nombre de cada fichero es YYYY = Año, MM = Mes y DD = Día. Fuente [Desai y Bertiger \(2012\)](#)

En la solución de ambigüedades con GIPSY-OASIS, se sigue lo dispuesto en [Bertiger et ál. \(2010\)](#), siendo los pasos más importantes los que se resumen a continuación:

1. En primer lugar se procesan de manera externa los datos de una red global de estaciones GPS, con resolución de ambigüedades de red, para dar posición a estaciones GPS y satélites resolviendo sus osciladores.
2. Una vez procesado, se almacena la información sobre las tendencias de fase y los WL en un fichero interno de GOA, denominado WLPBLIST, que se encuentra disponible para los usuarios de posicionamiento puntual.

3. Utilizando el listado de WLPBLIST, el software toma información del posicionamiento del receptor del usuario y de ahí forma una lista de posibles dobles diferencias que engloban el receptor local que se va a posicionar (L), una estación de la solución de red global (G) y un par de transmisores (I,II) con observaciones comunes.
4. Para formar esta lista de estaciones globales y transmisores no son necesarios los datos de observación sino que únicamente se requieren los intervalos de tiempo del fichero WLPBLIST junto a la información de los receptores locales.
5. Una vez definidas las estaciones, se resuelven los incrementos WL dobles diferencias del receptor desconocido utilizando para ello los valores WL base de la estación principal proveniente del fichero WLPBLIST.
6. Posteriormente, se plantea la corrección de las diferencias de fase respecto a lo calculado en la red global para resolver así los incrementos NL.
7. Obtenidos ambos incrementos, NL y WL, se aplica un ligero constreñimiento sobre las diferencias de fase dobles diferencias. Esto es importante ya que un condicionamiento de este tipo permite añadir cierta variabilidad a la solución global.
8. En caso de falta de convergencia, se pueden aplicar iteraciones en los primeros pasos de la resolución de ambigüedades.

En el proceso de cálculo GIPSY-OASIS accede de manera remota a los servidores del JPL para descargar todos los datos e información necesaria para el procesamiento PPP. En la tabla 6.1 se muestra un resumen de los ficheros descargados en el proceso así como una descripción de los mismos. Dentro de esta misma tabla uno de los que tienen más importancia, al contener las calibraciones de antena es `YYYY-MM-DD.ant.gz`. Este fichero contendría la información conjunta de un fichero tipo “xyz” con las calibraciones de las antenas de los satélites GPS y de otro con extensión “atx”, con los datos correspondientes a las antenas de los receptores. Estos dos ficheros serían del tipo `igs08_WWWW`, referidos al sistema IGS08 y a la semana GPS más reciente de las que se dispongan datos de calibración.

Respecto a los formatos más usuales, GOA dispone de ficheros de tipo ASCII y binarios. Dentro de los de formato texto se destacan los que contienen una tabla de parámetros dependientes del tiempo (TDP) que aparecen durante el procesado; el fichero WLPBLIST, que se encarga de almacenar la información relativa a la resolución de ambigüedades con los datos WL y de fase; y el fichero `stacov`, con los datos de posicionamiento y la matriz covarianza asociada. Todos ellos son accesibles por el usuario en las distintas fases de cálculo.

### 6.3.2. Bernese 5.0

El software de procesado GPS Bernese (BSW) es un programa científico desarrollado en el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna AIUB que aplica un ajuste por mínimos cuadrados para la estimación de distintos parámetros y coordenadas (Dach et ál., 2007; Moreno, 2012). Sus primeras versiones en línea de comandos fueron lanzadas a partir de 1988 siendo en 2004, con la versión 5.0, cuando el programa dispuso de una interface en base a menús desplegables. En la actualidad las versiones disponibles del software son la 5.0 y la 5.2, con los ficheros auxiliares y de mantenimiento accesibles en <ftp://ftp.unibe.ch/>. El programa trabaja con 1200 módulos individuales, o scripts, que permiten un gran número de operaciones sobre las observaciones GPS. Entre las más importantes se pueden destacar los módulos de obtención de coordenadas, estimaciones de troposfera e ionosfera TEC, offset del reloj, transformación de coordenadas y gestión de ficheros RINEX, entre otros.

Una de las características más importantes de BSW es el alto grado de edición y manipulación que tienen sus aplicaciones internas. Aparte de poder modificar prácticamente todas las variables que participan en los distintos módulos, la estructura de carpetas y ficheros ASCII permite un control total y una personalización completa por parte de los usuarios. El programa en sí, aunque es nativo para sistema operativo LINUX, permite ser ejecutado en plataformas Windows mediante un compilador perl compatible. Los diferentes scripts, programados originalmente en lenguaje FORTRAN, están adaptados para una visualización mediante ventanas.

A efectos de gestión, el programa BSW instalado en su versión 5.0 se basa en 3 carpetas importantes: la primera, que recibe el nombre de BERN50, contiene todo el código fuente del programa, con los ficheros de control de procesado PCF, scripts, programas FORTRAN, ejecutables originales, así como ciertos datos de calibración; la segunda, denominada GPSUSER, dispone de los ficheros editados y en ella se almacenan todos los datos propios del usuario junto a los módulos modificados; la tercera, que recibe el nombre de GPSDATA, está planteada para almacenar las campañas de procesado.

A diferencia del software GOA, BSW utiliza un sistema de campañas de observación con una serie de carpetas donde se almacenan los datos de entrada y donde se registran las salidas y resultados. En la tabla 6.2 se define el contenido de las carpetas que participan de manera común en cada campaña.

En la figura 6.5 se puede observar el diagrama general de cálculo que sigue el software BSW, desde la incorporación de los datos para el procesado hasta la generación de los ficheros de salida. Las herramientas y aplicaciones están enmarcadas en los siguientes bloques:

Carpeta de campaña	Contenido
ORB	Ficheros orbitales, DCB y polo
STA	Ficheros de información sobre las estaciones
OUT	Salidas del programa
ATM	Ficheros de modelización de troposfera
ORX	RINEX originales
BPE	Logfiles del proceso BPE
RAW	Copias de ficheros RINEX
OBS	Ficheros de observación BSW
SOL	SINEX y ecuaciones normales

Tabla 6.2: Contenido de las carpetas de campaña BSW

- **Bloque de Órbitas:** Con los programas para la generación de los ficheros de órbitas estándar (STD) que son independientes de la fuente. Se incluyen además aquellos que actualizan las órbitas, los que generan en el formato preciso y los que realizan todas las operaciones propias sobre las efemérides. También se encuentran en este bloque las herramientas relacionadas con los EOP.
- **Bloque de Simulación:** Con todas las aplicaciones encargadas de generar observaciones simuladas GPS (código y fase, L1 o L1/L2) basados en la información estadística disponible, como el RMS, tendencias y saltos de ciclo.
- **Bloque de Transferencia:** Con los programas que generan los ficheros en formato Bernese a partir de las observaciones en RINEX y viceversa. Además esta parte incluye un conjunto de herramientas que permite el corte, concatenación y manipulación de estos ficheros.
- **Bloque de Conversión:** Con las aplicaciones que extraen la información necesaria para el procesado como las coordenadas, las velocidades ITRF en formato SINEX, los datos de antena en formato ANTEX, entre otros.
- **Bloque de Procesado:** Con los programas de procesado de los datos en código, de pre-procesado en código y fase para una o dos frecuencias, así como los que realizan la estimación de parámetros basados en observaciones GPS. En este apartado los programas más importantes son el de estimación de parámetros GPSEST y el de combinación de ecuaciones normales ADDNEQ2.
- **Bloque de Servicio:** Con una combinación de herramientas útiles que permiten la gestión y manipulación de los ficheros de datos binarios, facilitando una comparación de los conjuntos de coordenadas, muestra de residuos, entre otras opciones. También se incluye un conjunto de programas que permite la conversión de ficheros binarios a ASCII y viceversa.

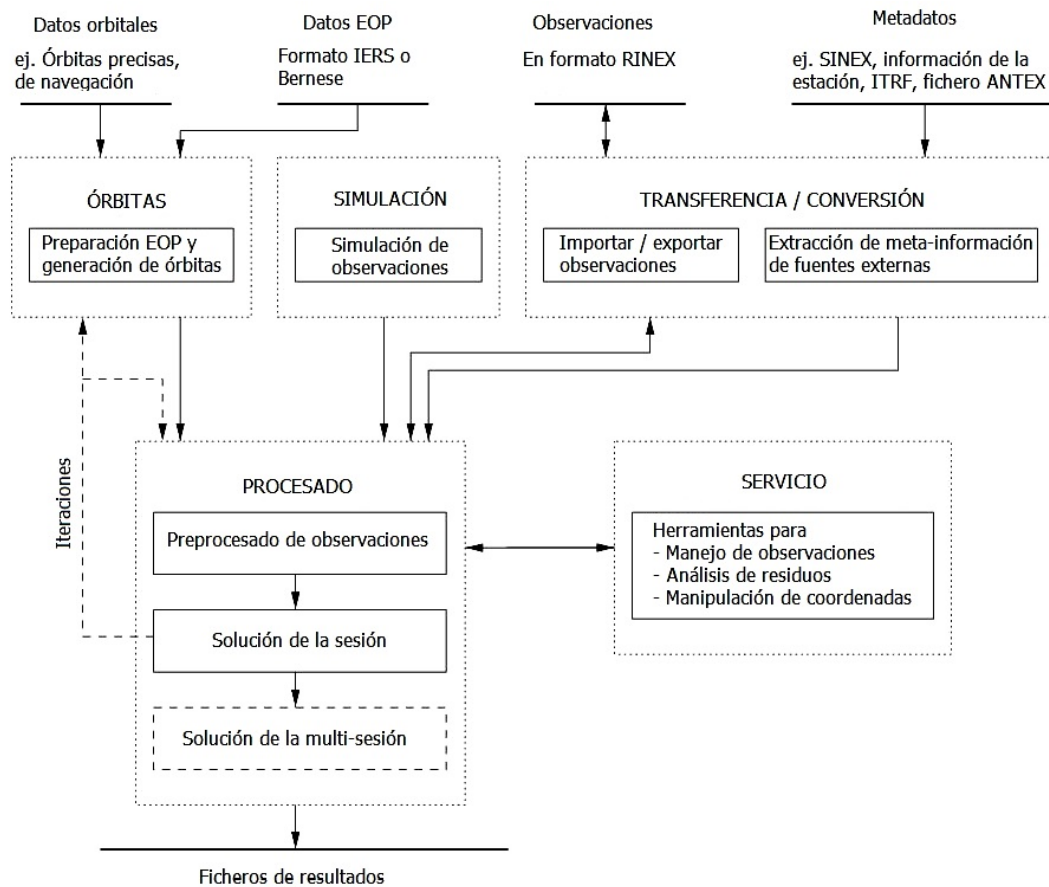


Figura 6.5: Diagrama de flujo de las aplicaciones en Bernese 5.0. Se muestran los bloques generales y las interrelaciones entre ellos. Fuente <http://www.bernese.unibe.ch/>

Desde la versión 5.0, el programa dispone además de una aplicación de automatización denominada *Bernese Processing Engine* (BPE) que se fundamenta en diversos módulos automatizados que permiten el cálculo de los distintos parámetros sin intervención directa del usuario. Estos módulos reciben el nombre de *Process Control File* (PCF) y vienen programados originalmente en la distribución del programa. Estos PCF definen los scripts que corren en la automatización así como el orden en el que deberán ser ejecutados (Hugentobler et ál., 2006). Esta aplicación es de gran utilidad en el caso de una estimación de coordenadas para estaciones en más de una sesión y para procesamiento con iteraciones internas en el cálculo. Los ficheros PCF que vienen en la instalación original del software son:

- PPP.PCF: Para el Posicionamiento Puntual de Precisión, utilizado originalmente por BSW para facilitar una coordenada inicial de mayor precisión que la de navegación para el uso en otros procesados.
- RNX2SNX.PCF: Para el procesamiento dobles diferencias, que es el procedimiento

por defecto en la mayoría de los casos en BSW. Este módulo realiza además una estimación de troposfera junto con el posicionamiento.

- **BASTST.PCF:** Para el procesado directo baselínea a baselínea utilizado en la resolución de ambigüedades.
- **CLKDET.PCF:** Para el procesado no diferencial enfocado a la estimación de las correcciones de reloj.

Centrándose en los scripts que componen el PPP.PCF, en líneas generales el proceso de cálculo se puede agrupar en tres fases bien diferenciadas ([Hugentobler et ál., 2006](#)):

1. **Fase de preparación:** Los primeros scripts se encargan básicamente de organizar los ficheros y prepararlos para la entrada en el proceso PPP. En primer lugar BSW transforma los ficheros del polo, efemérides precisas, ficheros de observación RINEX y reloj a formato Bernese. Los módulos que se utilizan son POLUPD, PRETAB, ORBGEN y CCRNXC respectivamente.
2. **Preprocesado Bernese:** Una vez preparados los ficheros, el programa realiza un sumario de los RINEX disponibles con el módulo RNXGRA; un suavizado de los mismos y una limpieza de outliers con RNXSMTAP y RNXSMT\_P respectivamente. Una vez tratados los ficheros, el programa se dispone a transformar los RINEX al formato propio de BSW con SMTBV3. También hace una fusión de ficheros de coordenadas con CRDMERGE, una sincronización del reloj del receptor junto a un primer posicionamiento por código con CODSPAP-CODSPP\_P y una extracción del sumario de resultados con el script CODXTR.
3. **Cálculo PPP:** En esta parte central el software ejecuta los scripts de cálculo propios del procesamiento PPP. El núcleo principal es el script PPPEDT\_P, que procesa estación por estación en un proceso iterativo en base a una estimación de parámetros con GPSEST. Dentro de este apartado se incluye la estimación de las sucesivas coordenadas PPP de todas las estaciones junto a los ficheros de sumario de los resultados. Una vez planteado el cálculo, el programa efectúa una serie de estadísticas para la determinación de errores y residuos con GPSXTR, PPPCHK y RESRMS; gestiona los ficheros de coordenadas con el módulo CRDMERGE y plantea la combinación de ecuaciones normales, ficheros SINEX y correcciones del reloj del receptor con los módulos ADDNEQ2 y CCRNXC respectivamente.
4. **Cierre del proceso** Una vez terminado el núcleo de procesado de la señal GPS, y con los ficheros de resultados ya calculados, el PCF se dispone a crear los sumarios finales y el borrado de los ficheros auxiliares prescindibles. Básicamente los tres scripts que participan, el de sumario PPP\_SUM, borrado

PPP\_DEL y limpieza PPP\_CLN, pueden modificarse en los archivos internos del BSW para optimizar el proceso de cálculo a fin de reducir el consumo de memoria y el tiempo de cómputo.

El procesado automático correspondiente al PPP tiene en cuenta además las siguientes consideraciones generales (Nankali, 2006): Por un lado utiliza las órbitas, correcciones de reloj y EOP de los productos finales IGS y CODE. Estos datos son los que determinan el marco de referencia y constituyen una característica propia de la técnica PPP que la diferencia del relativo. El software tiene además la capacidad de implementar un script para la transformación de coordenadas a otro sistema de referencia. Además los modelos geofísicos aplicados siguen las especificaciones definidas por IGS, acorde con las convenciones del IERS (IERS, 2010), junto a la carga oceánica estimada por el Observatorio de Onsala.

Para el filtrado de observaciones utiliza una máscara de elevación de  $10^\circ$ . Por defecto, las estimaciones de correcciones del oscilador del receptor son cada 5 minutos, aunque este valor puede modificarse para que soporte datos a 30 segundos con los nuevos productos IGS disponibles en alta frecuencia. En el caso de los valores de retardo de troposfera, BSW genera los ficheros a intervalos de 1 hora, no incluyendo los vectores gradientes de troposfera como la dependencia en acimut y elevación. Como modelo de retardo hidrostático y húmedo se utiliza la función de Niell (Niell, 1996).

Respecto a las ambigüedades, la característica más importante del procesamiento BSW-PPP es que no fija las ambigüedades enteras ni utiliza la solución de ambigüedades de una red auxiliar como hace GIPSY-OASIS (Bertiger et ál., 2010). En este caso hace uso de las soluciones flotantes junto a la combinación de ionosfera libre, lo que repercute directamente en la calidad de los resultados de coordenadas. Para las correcciones de la antena del receptor y el satélite, se siguen las especificaciones de las distintas convenciones IGS, con el uso del fichero ANTEX con los datos de calibración.

Una de las principales limitaciones del módulo PPP en BSW en la actualidad es que no interpola los valores de entrada del offset del reloj del satélite para las épocas de observación. Esto limita el procesado a la tasa de muestreo de este fichero (Moreno, 2012), incidiendo directamente en la precisión de los resultados.

### **6.3.3. Servicios de procesado PPP online**

#### **6.3.3.1. Servicio PPP online del JPL (APPS)**

El Servicio de Posicionamiento Preciso Automático APPS, anteriormente conocido como Auto-GIPSY, permite obtener soluciones de posición utilizando la aplicación predeterminada `gd2p.pl` del software GOA. Este servicio es gratuito, no dependiente de la aproximación o disponibilidad de datos CORS/IGS (Macdonald, 2004) y se distribuye bajo una versión online de acceso en <http://apps.gdgps.net/>. Además tiene la posibilidad de aplicar algoritmos especiales para el posicionamiento preciso y navegación de aeronaves.

Las referencias para los productos de órbitas y reloj, así como las soluciones de posicionamiento, están definidos en el marco ITRF2008. Para un mejor rendimiento, el servicio utiliza los ordenadores de los centros de operaciones del sistema GDGPS del JPL que se encuentran activos las 24 horas en Los Ángeles, Pasadena y Denver (JPL, 2006). Además, aplica por defecto los productos más precisos que están disponibles, tanto para los osciladores como para las órbitas, de gran utilidad en el caso cinemático o tiempo real.

Los usuarios del servicio APPS pueden especificar el ángulo de la máscara de elevación y el índice de salida de los datos en el caso de posicionamiento cinemático. Por defecto se aplica un ángulo de  $7,5^\circ$ , un muestreo de salida similar a los datos de entrada en cinemático y de 300 segundos en el caso estático. Si fuera necesario, las soluciones del reloj del satélite también pueden ser interpoladas. La aplicación utiliza automáticamente las variaciones del centro de fase de la antena del receptor y del satélite (APV) siguiendo los estándares definidos por IGS. Además, los datos de antena que se utilizan por defecto son los que vienen reflejados en la cabecera del fichero RINEX.

En el caso de receptores monofrecuencia, APPS aplica calibraciones ionosféricas basadas en datos GIM o datos de ionosfera en tiempo real, dependiendo de la disponibilidad. Normalmente, se puede acceder a los datos GIM con un día de latencia, reduciéndose a los 5 minutos de la observación los productos disponibles en tiempo real.

Las entradas para esta aplicación son directamente los ficheros RINEX de observación, siendo las opciones de envío la web de manera individual con usuario y contraseña a la dirección [https://apps.gdgps.net/apps/apps\\_file\\_upload.php](https://apps.gdgps.net/apps/apps_file_upload.php), mediante un correo electrónico a o subiéndolo el fichero RINEX a un servidor FTP anónimo. En todos los casos es necesario especificar el tipo de procesado que se quiera aplicar, ya sea estático o cinemático.

Los modelos y características del procesado aplicados por defecto en APPS son el efecto wind-up de fase (Wu et ál., 1993), la función de cartografiado de

la troposfera GMF, un retardo hidostrático a priori de 1,013 ( $2,27 \cdot 10^{-0,000116h}$ ) metros, donde  $h$  es la altura elipsoidal de la estación en metros, un retardo cenital húmedo a priori de 0,1 metros, los gradientes troposféricos descritos en [Bar-Server et ál. \(1998\)](#), la corrección de relatividad, marea oceánica, marea terrestre y polo a partir de lo especificado en la nota [IERS \(2010\)](#) y el uso del retardo ionosférico de primer y segundo orden ([Kedar et ál., 2003](#)).

En función a esto, los parámetros que genera APPS son las coordenadas de posición en modo estático; una serie temporal en modo cinemático; los estados de reloj con el ruido blanco en cada época de medida; el retraso cenital húmedo (ZWD) con varianza de  $3 \text{ mm}^2/\text{h}$ ; un gradiente en el retardo húmedo de  $0,3 \text{ mm}^2/\text{h}$  y la determinación de las ambigüedades de fase. Respecto a las salidas se incluyen un fichero de sumario con los valores, listado de salidas y errores del procesado; un fichero con las coordenadas XYZ y sus errores en el marco de referencia ITRF2008 y un fichero stacov y TDP con las coordenadas y covarianzas.

### 6.3.3.2. Servicio PPP online del CSRS (CSRS-PPP)

El Servicio de Posicionamiento Puntual de Precisión del Sistema de Referencia Espacial Canadiense (PPP-CSRS) provee de soluciones de posición en post-proceso vía internet con el envío de ficheros de observación GPS. Las soluciones están referenciadas al datum estándar de América del Norte de 1983 (NAD83) así como a ITRF ([Abdelazeem et ál., 2011](#)). La razón de esta doble determinación se centra en el hecho de que el primero de ellos es el adoptado como sistema de coordenadas de referencia para Canadá y Estados Unidos, siendo la base de la cartografía oficial. La relación con ITRF se determina a través de una transformación de 6 parámetros, con 3 rotaciones y 3 traslaciones bajo la misma escala. Ambos marcos son por tanto muy similares, con una diferencia de aproximadamente 2 metros en la posición del origen ([Nylen y White, 2007](#)).

Este servicio es accesible a través de la web del NRCAN <http://www.nrcan.gc.ca/>, utiliza las últimas efemérides disponibles en el momento del procesado y no requiere de una longitud mínima del fichero de observación. De manera general el posicionamiento se plantea con solución de ambigüedades, aunque en el caso de tratarse de un conjunto de datos no muy elevado, la aplicación calcula la posición en base a las observaciones de pseudodistancia de código ([CSRS, 2004](#)). El servicio permite procesar 6 días de datos simultáneamente y ficheros de hasta 100 Mb de tamaño.

Para la información de antena, CSRS-PPP utiliza los valores de calibración de los centros de fase publicados por IGS y NGS. La identificación del modelo de antena puede localizarse en la dirección web <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>, siendo importante que el tipo de antena quede perfectamente definido en la cabecera del fichero RINEX enviado ([Mireault et ál., 2008](#)).

Respecto al modelo ionosférico, y si la observación es monofrecuencia, se utilizan los mapas de ionosfera elaborados a intervalos de 2 horas en formato IONEX del IGS (Schaer et ál., 1998). Para el caso de observaciones bifrecuencia, se emplea la combinación libre de ionosfera en código y fase. Para la troposfera, el ZPD se obtiene a partir del GMF derivado del modelo meteorológico numérico del Centro Europeo para la predicción meteorológica de medio alcance (ECMWF) (Mireault et ál., 2008), así como del GPT, como modelo empírico que provee de presión y temperatura para la zona (Boehm et ál., 2007).

El fichero de entrada único es el RINEX de observación, que puede ser enviado con la aplicación propia de NRCAN denominada PPP-direct. Este software permite elegir el modo de procesado, estático o cinemático, el marco de referencia, NAD83 o ITRF, y el correo de envío de los resultados de una manera sencilla y automática.

Los resultados se definen con un conjunto de ficheros que incluyen las coordenadas cartesianas geocéntricas y geodésicas, el estado de reloj, el ZPD calculado y los errores asociados a estos parámetros. El formato general de estos ficheros es el ASCII, aunque la aplicación permite la generación de un PDF con el resumen de las distintas salidas.

### 6.3.3.3. Servicio PPP online del GAPS

GAPS es un software online para el procesado de la señal GPS con PPP que utiliza para el cálculo los ficheros de órbitas y relojes de IGS (Leandro, 2009; Leandro et ál., 2007). El servicio fue implementado originalmente en Matlab y posteriormente en C++ (Leandro et ál., 2008). Es accesible desde diciembre de 2009 a través de la web <http://gaps.gge.unb.ca/> y realiza el procesado mediante el envío de ficheros RINEX de manera individual con la especificación de los criterios de procesado (Leandro et ál., 2010).

Dentro de las consideraciones que hace el programa para cada parámetro, en el caso de la troposfera se emplean las funciones VMF1 para las componentes húmeda y seca (Boehm et ál., 2006). En el caso de no estar disponibles, el modelo se ajusta utilizando la función de Niell (NMF) (Marini, 1972; Niell, 1996). El ZPD se modeliza a partir del NCEP, ECMWF o UNB3m con sus respectivos retardos (Leandro et ál., 2008). Los gradientes se definen a partir de las funciones de Chen y Herring (Chen y Herring, 1997) estimados para cada observación y teniendo en cuenta un ruido del proceso de  $0,3 \text{ mm}/\sqrt{h}$ .

En el caso de disponer de observaciones bifrecuencia, el efecto de primer orden de ionosfera se elimina con combinaciones lineales; el efecto *wind-up* de la antena del satélite con lo especificado en Wu et ál. (1993) y las diferencias de

tendencias de código de los satélites P1-P2 y P1-C1 en base a los ficheros DCB proporcionados por el servicio CODE.

Respecto al offset del centro de masas del satélite, su definición y las variaciones del centro de fase PCV, se encuentran en el fichero de antenas semanal igs05\_www.atx, al igual que la corrección absoluta de la antena del receptor. Para las mareas sólidas terrestres se aplica lo especificado en IERS (2010) mientras que para la carga oceánica el modelo utilizado es el FES2004 (Letellier, 2004). Los efectos relativistas, por su parte, son corregidos a partir del modelo definido en Kouba (2009).

Los resultados que se generan son ficheros de orbitas cada 15 minutos y de reloj cada 30 segundos o 5 minutos, dependiendo de si se trata de posicionamiento estático o cinemático. La interpolación que utiliza es un ajuste polinomial a cada satélite de  $16^\circ$  para arcos de 6 horas y de  $2^\circ$  para arcos de 20 minutos (GAPS, 2013).

#### 6.3.3.4. Servicio PPP online de GMV (MagicGNSS)

Este servicio es operado por la empresa privada española GMV y se basa en un software propio desarrollado para la determinación de las órbitas del sistema Galileo y para la sincronización de tiempo. Su funcionamiento se basa en un algoritmo de mínimos cuadrados que minimiza los residuos de las observaciones determinando las órbitas, los offsets de los relojes de los satélites y el receptor, las ambigüedades de fase, los retrasos cenitales troposféricos y las coordenadas de las estaciones (Piriz et ál., 2008).

Este servicio online es gratuito para usuarios registrados y está disponible en la web <http://magicgnss.gmv.com/>. Se fundamenta en un conjunto de 36 estaciones receptoras que utilizan los algoritmos propios de MagicGNSS, denominados ODTS, que generan todos los productos. En estos algoritmos, la dinámica de la Tierra y el satélite están basados en los modelos definidos por las recomendaciones del IERS (IERS, 2010).

La aplicación es capaz de procesar ficheros GPS y GLONASS incluyendo el modelo de gravitación terrestre, las atracciones ejercidas por el Sol, la Luna y los planetas, las mareas terrestres solares, la presión de radiación solar (SRP) y el efecto de los eclipses (Piriz et ál., 2009). También se consideran los parámetros de rotación de la Tierra (ERP) del IERS y la combinación libre de inosfera en observaciones bifrecuencia.

Para el cálculo de la órbita se estima un vector de estado inicial, con una posición y velocidad en base a 5 parámetros SRP empíricos; las órbitas de los

satélites pueden ser propagadas en el tiempo utilizando los parámetros estimados y el modelo dinámico interno de los algoritmos ODTS ([Piriz et ál., 2008](#)).

Las correcciones de los osciladores se calculan a partir de valores instantáneos de medidas de tiempo. La estimación de estas correcciones se realiza normalmente cada 5 minutos, el mismo intervalo de muestreo que los cálculos internos. En los ODTS los offsets de los relojes de las estaciones y los satélites son estimados respecto a un reloj de referencia facilitado por una de las estaciones de la red de apoyo en tierra. Cada valor de estimación es posteriormente ajustado a un modelo lineal que puede ser extrapolado en el tiempo.

La salida del programa es un resumen en formato PDF con toda la información generada en los cálculos. Estudios realizados comparando las órbitas y relojes facilitados por IGS y los obtenidos por los ODTS en 30 estaciones con una semana de observación, establecen diferencias de 4 centímetros en el cálculo de órbitas y 0,15 nanosegundos en los osciladores, lo que confirma unos buenos resultados de la aplicación ([GMV, 2008](#)).

Las especificaciones resumidas de las técnicas online descritas, así como su comparativa según los parámetros de entrada y procesado PPP, se reflejan en la tabla 6.3.

6.- Procedimientos y software

Características	APPS	CSRS	GAPS	magicGNSS
Marco de referencia	ITRF2008	ITRF2008 y NAD83	IGb08	ITRF08 ETRS89
Formato de coordenadas	cartesianas y geodésicas	cartesianas, geodésicas y UTM	cartesianas y geodésicas	cartesianas y geodésicas
Información de calidad	Matriz de covarianza, error estandar	Matriz de covarianza, error estandar	Desviación estandar	-
Correcciones de antena	IGS	IGS	IGS	IGS
Órbitas de los satélites y relojes	JPL, rápidas y finales	IGS	IGS	IGS o GMV
Máscara de elevación	mínimo 7.5°	mínimo 10°	mínimo 10°	mínimo 10°
Datos GNSS	GPS	GPS y GLONASS	GPS	GPS y GLONASS
Software	GOA 6.2	CSRS-PPP	GAPS 5.2 v5.2.0	magic GNSS v5.3
Número de ficheros	Máximo 1 fichero de 10 MB	Máximo 1 fichero	Máximo 1 fichero	Máximo 2 ficheros de 10MB
Frecuencias	monofrecuencia y bifrecuencia	monofrecuencia y bifrecuencia	bifrecuencia	bifrecuencia
Datos de observación	estático y cinemático	estático y cinemático	estático y cinemático	estático y cinemático
Ficheros de entrada	e-mail, web y FTP	e-mail y PPP-direct	Aplicación web	e-mail y FTP
Modelo Troposfera	GMF	GPT y GMF	NCEP, ECMWF y VMF1	-
Carga Oceánica	FES2004	FES2004	FES2004	Definido por el usuario
Wind-up	si	si	si	si
<a href="#">Wu et ál. (1993)</a>				
Ionosfera 2° orden	si	no	no	no

Tabla 6.3: Características de los distintos procesamientos PPP online disponibles, parámetros de entrada y correcciones aplicadas. Fuente [Mulic et ál. \(2013\)](#)

## 6.4. Series temporales

El estudio de series temporales y su aplicación a la geofísica y geodinámica ha sido una metodología muy utilizada en época reciente; se tienen ejemplos de ello en investigaciones sobre tectónica de placas (Sella et ál., 2002), ajuste isostático (Sella et ál., 2007), deformación cortical debido a terremotos (Ergintav et ál., 2009), vulcanología (Larson et ál., 2010), entre otros.

Fundamentalmente, esta herramienta ha sido empleada en Geodesia para la determinación de la velocidad de la corteza terrestre en vértices y estaciones GPS. De manera general, el proceso de estimación se basa en dos componentes: por un lado la tendencia principal de la serie, que se puede asumir como lineal y, por otro, la indeterminación asociada a la misma en forma de ruido de fondo o ruido blanco, que debe ser filtrada o modelizada (Bos et ál., 2010).

De hecho, debido al elevado número de variables que participan en el posicionamiento con GPS, la serie temporal no se ve afectada únicamente por ruido de fondo, sino que además se añaden tendencias externas en forma de periodicidades o indeterminaciones relacionadas con la metodología de posicionamiento, efectos gravitatorios y la propia dinámica cortical (Ray et ál., 2008). Un gran número de investigaciones plantean que la incertidumbre en el cálculo de velocidades es normalmente demasiado optimista cuando se tiene en cuenta únicamente ruido de fondo y una tendencia lineal (Williams et ál., 2004), siendo necesario incluir alguna periodicidad simple o compuesta para añadir a la estimación lineal y obtener una velocidad más realista.

Considerando una modelización teórica de los procesos generales en una serie temporal, Agnew (1992) estudió las relaciones funcionales entre la frecuencia y el índice espectral incluidas en la siguiente ecuación:

$$P_x(\nu) = P_o \cdot \left(\frac{\nu}{\nu_o}\right)^k \quad (6.46)$$

donde  $\nu$  es la frecuencia,  $P_o$  y  $\nu_o$  son constantes normalizadas y  $k$  es el índice espectral. Según los valores que tome este índice espectral se tendrán procesos no estacionarios, sometidos a ruido de color, cuando  $-3 < k < -1$  y estacionarios, con ruido blanco, en el caso de  $-1 < k < 1$ . La presencia de ruido blanco es típico en modelos de relación donde  $k = 0$ , es decir, en el caso de que la relación se manifieste como una constante.

En base a esta formulación, se deduce que las series temporales están compuestas de manera general por una tendencia, o ruido de color, y una componente periódica o estacional, relacionada con el ruido blanco (Agnew, 1992).

Dentro de la tendencia se incluyen además cambios de largo período que pueden ser modelizados por funciones polinómicas en el dominio temporal  $ST(t_i)$ , tal como viene descrito en la ecuación 6.47 (Gülal et ál., 2013) :

$$ST(t_i) = \sum_{k=1}^m c_k t_i^{k-1} \quad (6.47)$$

donde  $c_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m$ ) corresponde a un parámetro que dependen del orden de la función polinómica y que multiplica a la componente tiempo  $t_i^{k-1}$ . En el caso concreto de una tendencia lineal con  $m = 2$ , el sumatorio toma la forma clásica de una regresión lineal simple del tipo  $ST(t_i) = at + b$ .

Para el modelizado de las periodicidades, el análisis se establece con la combinación de funciones trigonométricas  $SP(t_i)$  en el dominio temporal (Gülal et ál., 2013):

$$SP(t_i) = \sum_{s=1}^p [a_s \cos(2\pi f_s t_i) + b_s \text{sen}(2\pi f_s t_i)] \quad (6.48)$$

donde las funciones utilizadas seno-coseno tienen como argumento la frecuencia  $f_s$  ( $s = 1, 2, \dots, p$ ) de la señal y el tiempo  $t_i$ . Tanto el parámetro de la tendencia  $c_k$  como los correspondientes a la periodicidad,  $a_s$  y  $b_s$ , pueden ser estimados por mínimos cuadrados mediante algoritmos de ajuste.

### 6.4.1. Estudios de variabilidad en la serie

Para analizar el nivel de ruido en las series se utilizan factores de máxima verosimilitud, MLE (Langbein y Johnson, 1997) con programas que permiten implementar periodicidades en las propias estimaciones lineales (Williams, 2008). En este contexto es conveniente resaltar que muchos investigadores han revelado que, aparte de las periodicidades clásicas debido a los efectos gravitacionales de los cuerpos celestes, con períodos anuales, semianuales, mensuales y quincenales (Ray et ál., 2008), el ruido blanco periódico domina en altas frecuencias mientras que el no estacionario o de color se presenta en bajas frecuencias (Langbein y Johnson, 1997). Las series temporales de posiciones GPS muestran que la mejor solución MLE es aquella en la que el modelo asume una combinación de ruido blanco y de color (Amiri-Simkooei et ál., 2007; King y Williams, 2009; Williams et ál., 2004).

Otros estudios indicaron que el ruido de color tiene una magnitud mayor en el Hemisferio Sur, relacionado principalmente por el mayor número de estaciones presentes en el Hemisferio Norte (Williams et ál., 2004). En series temporales de coordenadas largas GPS se comprobó que los datos más antiguos eran en general más ruidosos que los más modernos, lo que vuelve a demostrar la estrecha relación entre el nivel de ruido y el número de estaciones que participan en el cálculo de los

marcos de referencia, parámetros espaciales y órbitas (Santamaría-Gómez et ál., 2011). En esta línea varios trabajos profundizan en esta idea, analizando la calidad de los parámetros que son estimados mediante series temporales Ostini (2012).

En la actualidad instituciones como EPN-EUREF y el JPL cuentan con series temporales de posiciones de estaciones permanentes a disposición del usuario. Su objetivo principal es facilitar el cálculo de velocidades, posicionamientos, generación de marcos y sistemas de referencias y para el mantenimiento de los sistemas GNSS. En la figura 6.6 se incluye la serie temporal de los residuos respecto a la posición estimada de la estación SFER de la red EUREF; en ella se muestran las tres componentes Este, Norte y Elevación así como las discontinuidades debido a cambios de marco y saltos. Se pueden observar además los errores asociados a las coordenadas y ciertas periodicidades.

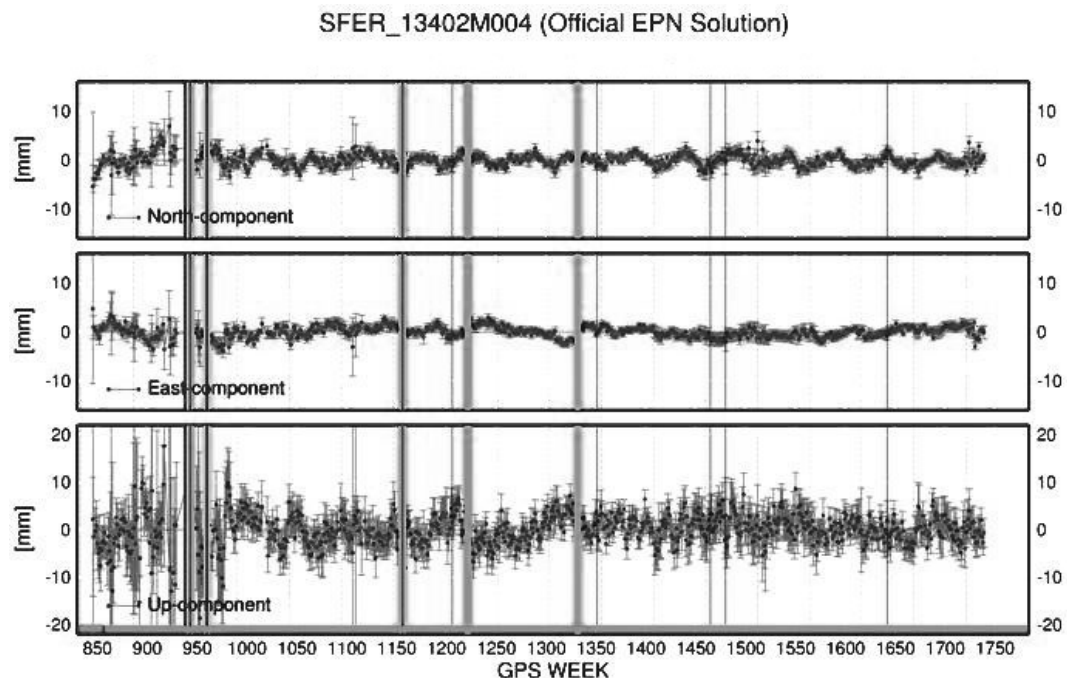


Figura 6.6: Serie temporal de 19 años de los residuos ENU respecto a la posición estimada de la estación SFER. Durante la estimación se han eliminado los outliers incluyéndose las discontinuidades. Fuente <http://www.epncb.oma.be/>

Dentro de las fuentes clásicas de ruido se destacan la propia determinación de las órbitas y osciladores de los satélites, parámetros espaciales y de orientación de la Tierra EOP, efecto multipath, así como la actividad solar que afecta a la ionosfera. Respecto a las principales periodicidades, son de importancia las combinaciones de período anual y semianual relativas al sol, las periodicidades mensuales y quincenales relacionadas con el movimiento lunar y las mareas correspondientes (IERS, 2010).

## 6.4.2. El programa CATS

El programa CATS es un software que utiliza la estimación de máxima verosimilitud (MLE) para ajustar un modelo multiparamétrico a una serie temporal como puede ser un registro continuo GPS ([Williams, 2008](#)). La rutina resuelve para todos los parámetros de manera simultánea la parte lineal con la pendiente de regresión; la magnitud de los saltos abruptos, como en el caso de cambios de antena y terremotos; y la determinación de términos sinusoidales en base a diferentes periodicidades.

Dentro de la tipología de incertidumbres que pueden considerarse el software incluye el ruido blanco, el de color, el ruido de primer orden de Gauss-Markov, el de paso banda ([Langbein, 2004](#)) y el ruido blanco variable en el tiempo.

El software CATS se basa en una serie de órdenes en línea de comandos bajo LINUX, y no requiere de más ficheros que el propio de serie temporal de coordenadas locales (Este, Norte Elevación) para poder trabajar, así como la definición del modelo y las periodicidades que se quieran utilizar. Sus fundamentos teóricos vienen desarrollados en [Langbein y Johnson \(1997\)](#), [Mao et ál. \(1999\)](#), [Williams et ál. \(2004\)](#) y [Langbein \(2004\)](#).

Las características generales del programa, dentro de la correcta modelización de los parámetros en la serie temporal, serían las siguientes:

- La utilización de modelos de ruido basados en el método de diferencia fraccional ([Hosking, 1981](#)).
- La determinación de la matriz covarianza según lo descrito en [Zhang et ál. \(1997\)](#) y [Mao et ál. \(1999\)](#).
- La utilización de la matriz de covarianza para el estudio del ruido rosa (*flicker noise*) derivado de un algoritmo de simulación ([Gardner, 1978](#)).

La estructura general del fichero de serie temporal de entrada se compone de una cabecera y un cuerpo (Figura 6.7). La cabecera está diferenciada del resto porque sus filas se inician con una almohadilla (#), en ella se describen las coordenadas cartesianas geocéntricas y geodésicas de la estación, un apartado con la época de los offsets de la serie y un código con la componente a la que afecta ([Williams, 2008](#)). Respecto al cuerpo del fichero, toda la información se encuentra organizada por columnas con una parte para la época de la coordenada (en año decimal), tres columnas con las coordenadas locales y tres más para los errores asociados. Es importante resaltar que el origen de la serie temporal con coordenada cero es el primer punto, siendo la referencia de toda la serie.

```
# Site: ALAC
# X: 5009051.399
# Y: -42072.472
# Z: 3935057.504
# Latitude: 38.3389215
# Longitude: -0.48122787
# Height: 0
# offset 2010.7836
2010.24520 0.00000 0.00000 0.00000 0.00113 0.00076 0.00084
2010.24790 -0.00071 0.00019 -0.00154 0.00126 0.00086 0.00093
2010.25070 -0.00022 0.00031 -0.00331 0.00121 0.00082 0.00091
2010.25340 -0.00491 0.00002 -0.00133 0.00137 0.00091 0.00102
2010.25620 -0.00404 0.00030 -0.00621 0.00125 0.00082 0.00093
2010.25890 -0.00404 0.00219 -0.00409 0.00126 0.00083 0.00092
2010.26160 -0.00703 0.00149 -0.00270 0.00123 0.00082 0.00091
2010.26440 -0.00823 0.00313 -0.00140 0.00134 0.00089 0.00100
2010.26710 -0.00602 0.00210 -0.00121 0.00112 0.00074 0.00084
```

Figura 6.7: Estructura de fichero CATS donde muestra la cabecera y las siete columnas de datos de la serie temporal. Fuente ([Williams, 2008](#))



# 7

## Redes GNSS en las zonas de estudio

---

*“En esta investigación se han utilizado 507 determinaciones astronómicas - 265 de latitud, 79 de longitud y 163 de acimut”*

John F. Hayford (1868-1925)

### 7.1. Redes permanentes GNSS

Una Red Permanente de Estaciones de referencia GNSS es un conjunto de estaciones equipadas con dispositivos y tecnología para dar un servicio de posicionamiento de forma homogénea en el interior de un área definida. La densidad y cobertura de las estaciones de la red es importante para un correcto cálculo de las correcciones en el caso diferencial y para la obtención de modelos con cobertura suficiente. El fin último es ofertar un servicio global a los usuarios de la zona.

En las últimas décadas, el desarrollo de las técnicas de comunicación y la instrumentación geodésica han posibilitado el establecimiento de estaciones permanentes para la recepción de la señal de los sistemas GNSS. Este paso era impensable hace tan sólo 20 años, cuando en los inicios del uso de estos sistemas las campañas esporádicas de medición eran el procedimiento usual para el cálculo de coordenadas y velocidades. Los vértices de las redes geodésicas inferiores, anteriormente observados con técnicas clásicas, comenzaron a calcularse mediante campañas GPS episódicas, lo que permitió integrarlos en sistemas de referencia globales.

Originalmente la instalación de redes permanentes venía a paliar la necesidad de una mayor cobertura territorial y una recepción continua de la señal para poder satisfacer la incipiente necesidad de correcciones diferenciales en tiempo

real RTK, aspecto que estaban demandando los usuarios en esos momentos. Posteriormente, las capacidades computacionales y la gestión de series temporales continuas permitieron a los organismos que disponían de estas redes, la estimación de marcos de referencia en el ámbito de la red.

Con la generalización del uso de internet, y el acceso cada vez mayor de las instituciones y organismos a equipos receptores GNSS, la creación de redes permanentes se fue extendiendo paulatinamente comenzando por las redes internacionales IGS y EUREF en la década de 1990 y completándose con los institutos geográficos nacionales, como en el caso español, a partir de 2000. Tras el traspaso de competencias desde el gobierno central, los diferentes organismos territoriales encargados de las Comunidades Autónomas iniciaron su despliegue en torno a 2005-2006. Todo ello ha propiciado una densificación considerable de este tipo de estaciones facilitando el acceso a los usuarios tanto en tiempo real como en posproceso.

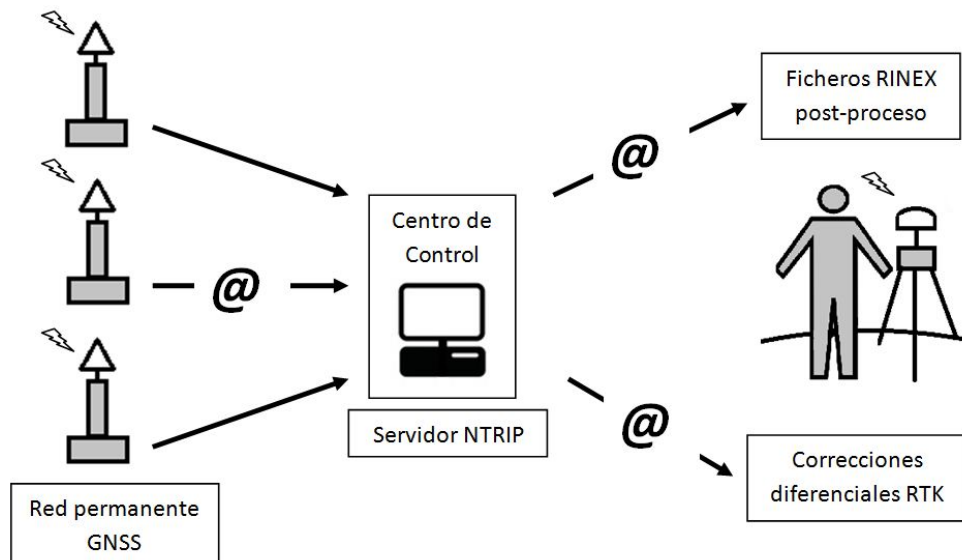


Figura 7.1: Esquema de funcionamiento de una red permanente GNSS

La estructura de una red permanente GNSS queda reflejada en la figura 7.1. Cuenta con un conjunto de receptores conectados a un centro de control que coordina la recepción de datos y emisión de correcciones y unos usuarios finales que accederán a estos productos vía internet o emisiones directas de radio.

Puesto que las estaciones de observación GNSS se encuentran recibiendo la señal de los satélites de manera continua, es necesario que cuenten con medios que eviten interrupciones en la corriente eléctrica y acceso permanente a internet. Toda la información adquirida por las estaciones es enviada a un centro de control,

o centro de recepción, que se encargará de almacenar los datos, gestionar la red y servir de comunicación con el usuario mediante la emisión de las correcciones diferenciales.

Los productos generados, los ficheros RINEX para post-proceso en diferentes índices de muestreo y las correcciones diferenciales, son emitidas mediante protocolo NTRIP para la corrección de la posición final del receptor. Normalmente los ficheros RINEX para post-proceso pueden obtenerse a través de una FTP, alojada en el propio centro de control de la red, o mediante un formulario de internet.

En las zonas de trabajo se localizan varias redes permanentes GNSS cuyos datos serán utilizados para el desarrollo de esta tesis doctoral. Se tiene por un lado la red superior EPN/EUREF de cobertura europea y las redes regionales de la Comunidad Murciana (REGAM), la Red Andaluza de Posicionamiento (RAP) la red del Archipiélago Balear (XGAIB) y la red de la Comunidad Valenciana (ERVA) que prestan el servicio de posicionamiento en sus respectivos territorios.

### **7.1.1. Monumentación**

La monumentación es un aspecto importante a la hora de establecer una red permanente GNSS ya que la estabilidad de la antena está directamente relacionado con la calidad de la señal registrada (Lidberg y Lilje, 2007). Existen dos tipologías de monumentación que se han ido implementando en esta clase de redes, aquellas que utilizan un mástil de acero o las que poseen un pilar hormigonado de altura variable.

Respecto a los mástiles de acero, tienen la ventaja de tener una rápida instalación, ya que únicamente requieren ser atornillados a paredes o resaltes del edificio, y cuentan además con gran versatilidad para elevar la antena sobre los obstáculos. El principal inconveniente que poseen es que están sometidos a dilataciones elevadas debido a los cambios de temperatura, lo que puede afectar a la calidad de los datos registrados, y sus partes son más susceptibles de degradación por las condiciones meteorológicas reinantes.

Los pilares hormigonados, por su parte, son el medio utilizado tradicionalmente y con mayor profusión para el establecimiento de vértices geodésicos (Gülal et ál., 2013), presentan la ventaja de ser muy estables y duraderos frente a las condiciones meteorológicas, pero tienen la dificultad a la hora de instalarlos sobre terrazas y azoteas debido a su peso y de cierta complejidad a la hora de coger altura para superar los obstáculos cercanos. Además su proceso constructivo no es tan sencillo como en el caso de los mástiles de acero. En la figura 7.2 se muestran dos ejemplos de monumentación que se pueden encontrar en las redes de las zonas de trabajo.



Figura 7.2: Ejemplo de monumentación de estación permanente mediante mástil de acero (ALAC) y pilar hormigonado (TERU)

A la hora de definir la monumentación se consideran varios factores, por un lado la situación donde está instalada la estación, si su prioridad son las correcciones diferenciales, la eliminación de obstáculos cercanos o la necesidad de un acceso continuo a internet. La colocación sobre tejados de edificios gubernamentales suele ser una solución idónea y no muy costosa para solventar estos problemas, aunque implica el uso de materiales ligeros adaptados a la estructura para evitar daños a la cubierta. La necesidad de altura se solventa con mástiles de acero que superen el obstáculo. En el caso de la posibilidad de instalación en campo abierto, la instalación elegida tiende al pilar hormigonado por las ventajas que ofrece. De este modo es usual encontrar diferente monumentación en estaciones pertenecientes a la misma red permanente según las necesidades del lugar.

### 7.1.2. Instrumentación

Las estaciones pertenecientes requieren de una instrumentación específica para poder desempeñar correctamente la observación y comunicación con el centro de control de su red. El receptor debe tener la capacidad de conectarse a internet y tener una interface de comunicación adecuada para que el centro de control pueda acceder al mismo en el caso de descarga manual y configuración. Los fabricantes de receptores GNSS disponen de modelos adaptados para estas necesidades como son la serie LEICA GRX1200, LEICA GR10, Trimble NETRS y ASHTECH Z-XII3,

todos ellos con un puerto de conexión e interface configurable. Actualmente, los modelos modernos son capaces de recibir además varias señales GNSS lo que ha aumentado el espectro de observaciones que hasta hace poco tiempo se limitaba únicamente a la señal GPS.

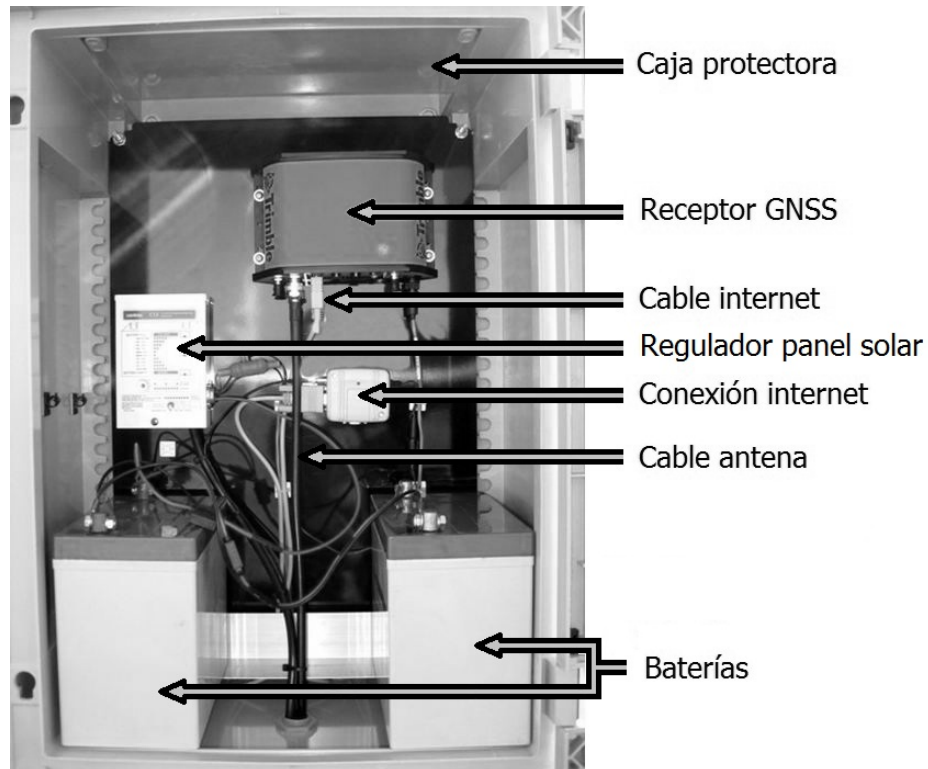


Figura 7.3: Distribución de elementos de la estación permanente GNSS situada en Triacastela (TRIA). Fuente TOPOIBERIA

Normalmente las estaciones cuentan con cajas protectoras donde se alojan todos los elementos necesarios (Figura 7.3). Es común que exista un sistema de respaldo de energía a modo de Sistema de Alimentación Ininterrumpida (SAI) o baterías, para evitar los cortes eléctricos. También cuentan con reguladores, cables para conexiones a internet y un cable de antena coaxial, que envía la señal recogida por la antena directamente al receptor.

Las antenas de estas estaciones por su parte deben tener una protección para el efecto multipath (Figura 7.4), ya que es habitual la presencia de paredes, construcciones o pantallas en las cercanías de las estaciones. El uso de antenas Choke-Ring con domo protector es común en estas redes, lo que preserva a la antena además de las inclemencias meteorológicas.

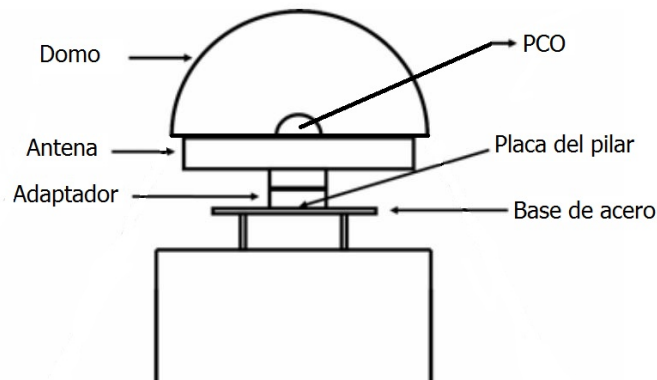


Figura 7.4: Representación de la antena de una estación permanente GNSS con sus elementos más destacados. Fuente [Lidberg y Lilje \(2007\)](#)

## 7.2. Distribución

En este apartado se comentarán todas las redes permanentes GNSS ubicadas en las cercanías de las zonas de estudio, Archipiélago Balear y sector oriental de la Cordillera Bética, definiendo sus características y servicios que prestan al usuario.

### 7.2.1. Red permanente EUREF-(EPN)

La red EUREF-EPN es una red de estaciones permanentes con más de 200 estaciones de referencia GNSS operativas por el continente Europeo y que son utilizadas para el mantenimiento del datum geodésico del sistema ETRS89. La gestión y conservación de la red no la lidera una institución central, sino que se lleva a cabo por el acuerdo de un gran número de agencias europeas, nacionales y universidades encargadas de que sus estaciones tengan unos criterios de calidad y servicio homogéneos según los estándares predefinidos por EUREF.

Los inicios de esta red permanente están relacionados con los trabajos llevados a cabo por la subcomisión para el marco de referencia europeo de la Asociación Internacional de Geodesia IAG, en 1987. Dos años más tarde, en 1989, EUREF comenzó sus estudios planteando una primera campaña de medida GPS que cubría Europa occidental, desde entonces se han desarrollado otras campañas de posicionamiento que mejoraron la precisión del marco europeo, aumentando también el territorio de trabajo hacia la Europa oriental.

Con el establecimiento de las primeras estaciones permanentes GPS en Europa, la subcomisión EUREF decidió explotar su despliegue y utilizarlas para

el mantenimiento del Marco de Referencia Europea en el Simposio de Helsinki de 1995 Gurtner (1995), como complemento de las campañas episódicas que se habían estado llevando a cabo. Fue entonces cuando se establecieron unas bases para la organización de la EPN como son las estaciones permanentes GPS que la componen, los centros operacionales, los centros de datos locales y regionales así como los centros locales y regionales de análisis, organigrama que ha permanecido hasta la fecha.



Figura 7.5: Distribución geográfica de las estaciones de la red EUREF en la Península Ibérica y Baleares

En la actualidad, la red EPN cuenta con un total de 248 estaciones permanentes distribuidas en 39 países de las cuales 32 se encuentran en España peninsular y Archipiélago Balear (Tabla 7.1) que a su vez pertenecen a redes nacionales o regionales (Figura 7.5). En concreto, en la zona de estudio se han utilizado los datos proporcionados por las estaciones de Almería (ALME), Alicante (ALAC), Valencia (VALE), Borriana (BORR), Teruel (TERU), Observatorio de L'Ebre (EBRE) y Mallorca (MALL), todas ellas con datos continuos desde 2005, o incluso anteriores, como es el caso de ALAC o EBRE. Los datos se pueden acceder a través varias direcciones FTP aunque en esta tesis doctoral se utilizaron los generados por el centro de análisis regional del BKG <ftp://igs.bkg.bund.de/EUREF/obs> ya que cuenta, no solo con los ficheros RINEX diarios a 30 segundos de muestreo, sino que también aloja información sobre el procesado de la red y productos para el usuario como ficheros de reloj y efemérides precisas.

Algunas estaciones comparten la pertenencia no solo a la red EUREF, sino también a otras redes regionales e internacionales. Este es el caso de la estación de Borriana (BORR), que también está adscrita a la Red de Estaciones de Referencia de Valencia (ERVA), Mallorca (MALL) que está incluida a su vez en la red de Baleares XGAIB y la estación EBRE, que a su vez pertenece a la red CATNET del Institut Cartogràfic de Catalunya y a la red internacional IGS.

Estación	Descripción	Estación	Descripción
ACOR	La Coruña	LAGO	Lagos
ALAC	Alicante	LEON	León
ALBA	Albacete	LLIV	Llivia
ALME	Almería	MALA	Málaga
BELL	Bellmunt de Segarra	MALL	Palma de Mallorca
BORR	Borriana	RIO1	Logroño
CACE	Cáceres	SALA	Salamanca
CANT	Santander	SFER	San Fernando
CASC	Cascais	SONS	Sonseca
CEBR	Cebreros	TERU	Teruel
COBA	Córdoba	VALA	Valladolid
CREU	Cabo de Creus	VALE	Valencia
EBRE	Observatori de L'Ebre	VIGO	Vigo
ESCO	Naut Arán	VILL	Villafranca
GAIA	Gaia	YEBE	Yebes
HULV	Huelva	ZARA	Zaragoza

Tabla 7.1: Designación de las estaciones de la red EUREF en la Península Ibérica y Baleares

### 7.2.2. Red de la Comunidad Valenciana (ERVA)

La Red de Estaciones de Referencia de Valencia (ERVA) se desarrolló a partir del impulso de la Generalitat Valenciana con el objetivo de proveer de datos GNSS para post-proceso y tiempo real en el ámbito de esa comunidad autónoma. Los orígenes del proyecto estarían a finales de 2004 y principios 2005 con el inicio de la difusión de datos en tiempo real para DGPS/RTK y post-proceso a los usuarios. En la actualidad uno de sus objetivos principales de la red es la inter-operatividad con las redes GNSS de comunidades limítrofes así como en el estudio de calidad y densificación de la red en la Comunidad Valenciana.

Las estaciones de la red ERVA están localizadas en lugares públicos de la administración autonómica, con conexión permanente a internet para el registro y almacenamiento de las observaciones, y cuenta con un total de 8 estaciones que se encuentran descritas en la tabla 7.2. El 12 de abril de 2012, la estación de Morella

Estación	Descripción	Estación	Descripción
ALCO	Alcoy	MORE	Morella (hasta 2012)
AYOR	Ayora	TORR	Torreveja
BERG	Bergantes (desde 2012)	UTIE	Utiel
BORR	Borriana (EUREF)	VCIA	Valencia-Pinedo
DENI	Denia		

Tabla 7.2: Designación de las estaciones de la red ERVA

(MORE) fue sustituida por la cercana estación de Bergantes (BERG), siendo la última estación incorporada a la red ERVA (Figura 7.6). El servicio de datos RINEX para post-proceso se puede acceder a través de <ftp://icvficheros.icv.gva.es>, donde se distribuyen los ficheros RINEX horarios a 1 y 5 segundos, así como los diarios 24 horas 30 segundos. En esta dirección también está disponible la información relativa a la descripción de las estaciones, reseñas e incidencias.

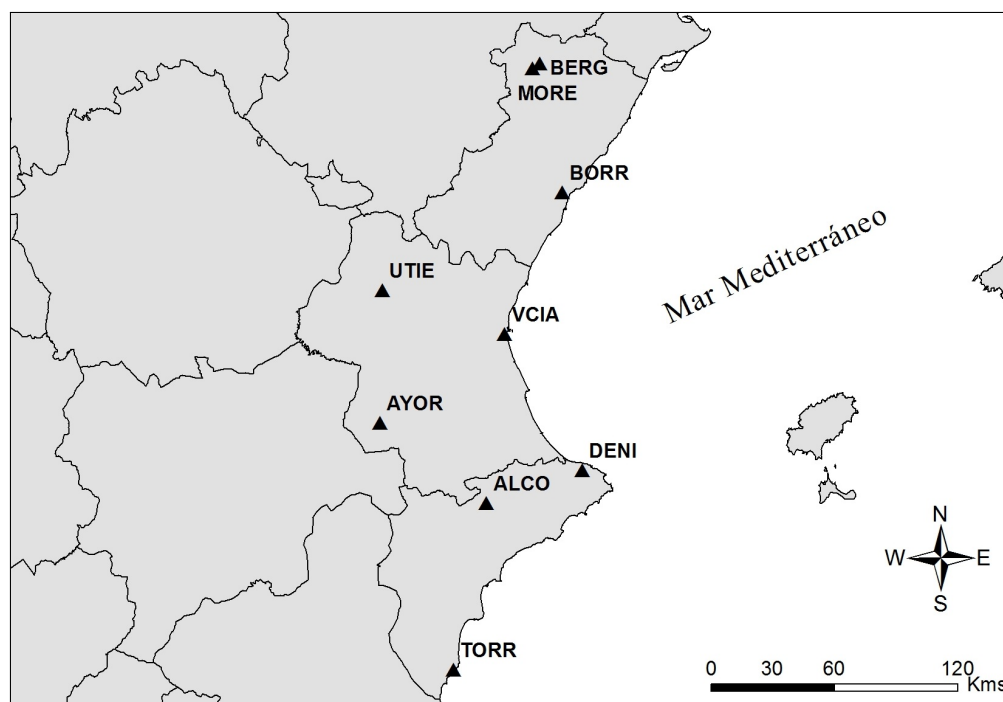


Figura 7.6: Distribución geográfica de las estaciones de la red ERVA

En cuanto a la instrumentación utilizada, esta red no tiene una tipología de receptor homogéneo en sus estaciones como pasa en otras redes regionales. Aunque en un principio se instalaron receptores de la marca Trimble, como los de la serie 5700 en DENI y UTIE y los más modernos NETRS y R7, otras estaciones y algunas que comparten pertenencia a otras redes superiores, cuentan con receptores de la marca Leica del tipo GRX1200GG. Esto es debido a una instalación por etapas efectuada entre 2005 y 2007.

### 7.2.3. Red del Archipiélago Balear (XGAIB)

La red XGAIB (Xarxa de Geodèsia Activa de les Illes Balears) es una red geodésica activa que da servicio al Archipiélago Balear, gestionada por el Serveis d'Informació Territorial de les Illes Balears (SITIBSA) y con información accesible a través de la web <http://xarxagnss.caib.es>. Consiste en un total de 9 estaciones GNSS que están activas desde 2010 y que dan un servicio de correcciones diferenciales y ficheros RINEX para post-proceso para todo el archipiélago. En la tabla 7.3 se puede consultar la nomenclatura y descripción.

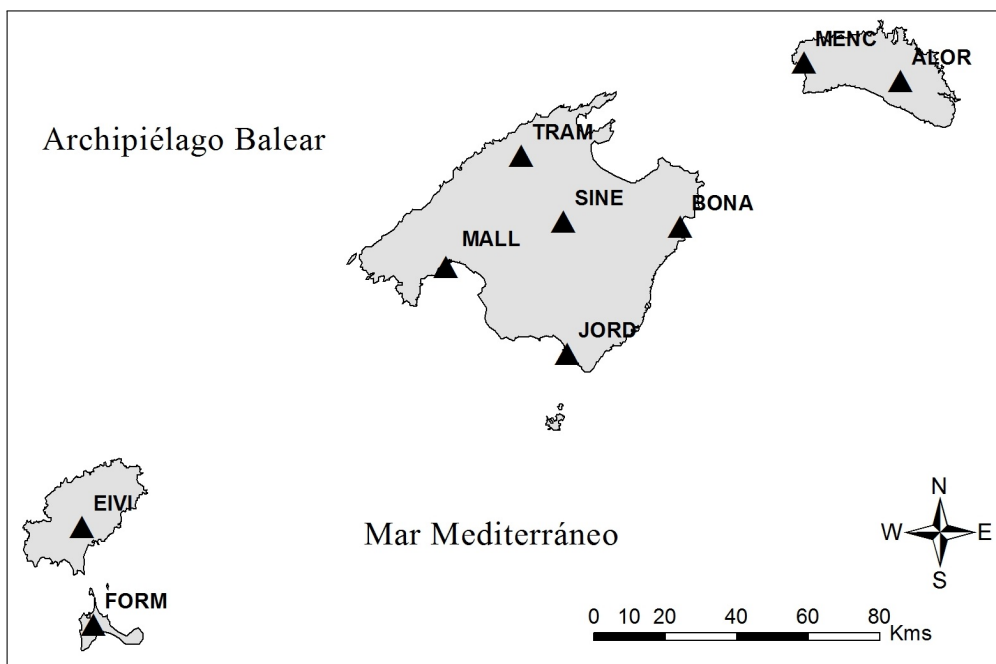


Figura 7.7: Distribución geográfica de las estaciones de la red XGAIB

Las estaciones de la red XGAIB están distribuidas homogéneamente por todas las islas del archipiélago (Figura 7.7), contando la Isla de Mallorca con 5 vértices, 2 en Menorca y otras 2 en las Islas Pitiusas (Ibiza y Formentera). De este modo se cumple el objetivo de una cobertura adecuada a los usuarios finales en la comunidad.

Todas las estaciones cuentan con receptores GNSS de la marca Leica GRX1200 + GNSS con antena LEIAR25 y Choke-Ring. La monumentación es generalmente con pilar hormigonado, como en el caso de Mallorca (MALL) y Serra de Tramuntana (TRAM), aunque algunas estaciones disponen de mástil de acero acoplado a la cubierta. Las antenas están situados en edificios oficiales para preservar la conexión a internet, básica para el envío de datos y correcciones diferenciales al centro de control. La estación situada en Palma de Mallorca (MALL) además pertenece a la red EUREF como parte de la red permanente GNSS europea.

La homogeneidad en los datos registrados por esta red es una característica importante, ya que no se han producido cambios de antena o de ubicación de las estaciones en el tiempo en la que ha estado en servicio.

Estación	Descripción	Estación	Descripción
ALOR	Alaior	MALL	Palma de Mallorca (EUREF)
BONA	Cala Bona	MENC	Menorca
EIVI	Ibiza	SINE	Sineu
FORM	Formentera	TRAM	Tramuntana
JORD	Colonia Sant Jordi		

Tabla 7.3: Designación de las estaciones de la red XGAIB

#### 7.2.4. Red Andaluza de Posicionamiento (RAP)

La Red Andaluza de Posicionamiento ([RAP](#)) es una red de 22 estaciones permanentes GNSS distribuidas por la Comunidad Autónoma Andaluza y gestionada por la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía. Su misión principal es emitir correcciones diferenciales en tiempo real y ficheros RINEX para post-proceso en el ámbito de la comunidad autónoma.

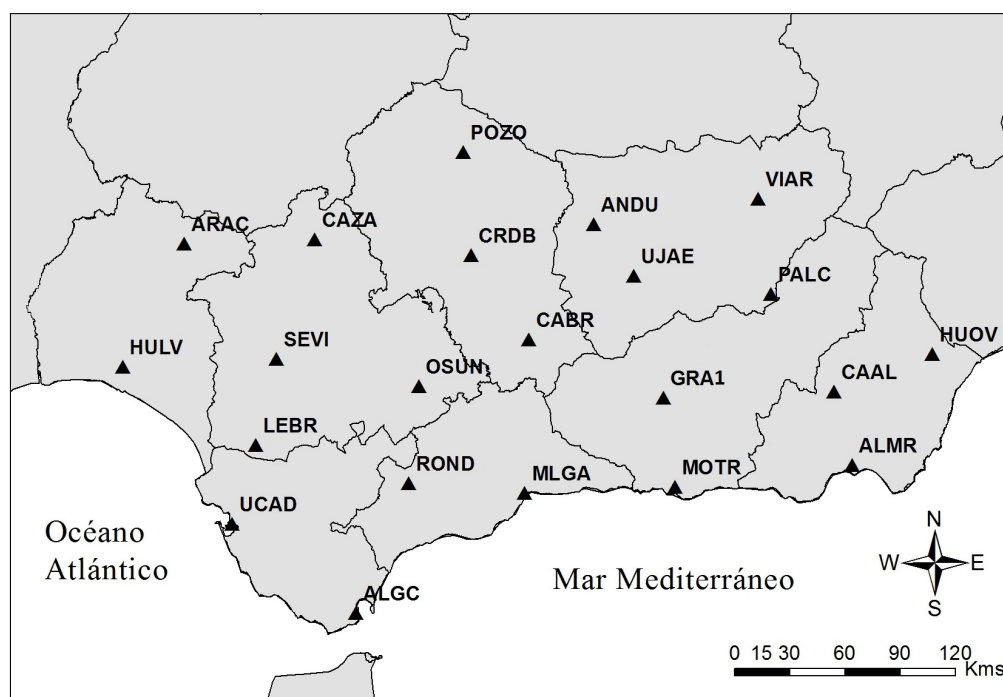


Figura 7.8: Distribución geográfica de las estaciones de la red RAP

A la hora del diseño se siguieron una serie de criterios basados, por un lado, en una cobertura óptima de la región para facilitar los trabajos topográficos mediante la emisión de correcciones diferenciales simples y de red y, por otro, tener un acceso estable a internet con la instalación de las antenas en edificios públicos pertenecientes a la Junta de Andalucía (hospitales, institutos de secundaria y consejerías). En la actualidad las capitales de las 8 provincias cuentan con una estación permanente, completándose la red en los lugares donde era necesario una ampliación de la cobertura. En la figura 7.8 se observa la distribución de las estaciones.

Los inicios de esta red comenzaron en el año 2004 cuando las Universidades de Cádiz y de Jaén contaban con sendas estaciones permanentes, UCAD y UJAE. Posteriormente se fueron añadiendo sucesivamente las que se llegaron a llamar "primera fase", situadas en las capitales de provincia de Andalucía. La red quedó completada totalmente en 2009, cuando se instaló la última estación en Pozo Alcón (PALC).

Estación	Descripción	Estación	Descripción
ANDU	Andújar	LEBR	Lebrija
ALGC	Algeciras	MLGA	Málaga
ALMR	Almería	MOTR	Motril
ARAC	Aracena	OSUN	Osuna
CAAL	Observatorio Calar Alto	POZO	Pozoblanco
CABR	Cabra	PALC	Pozo Alcón
CAZA	Cazalla de la Sierra	ROND	Ronda
CRDB	Córdoba	SEVI	Sevilla
GRA1	Granada	UCAD	Universidad de Cádiz
HULV	Huelva	UJAE	Universidad de Jaén
HUOV	Huerca Overa	VIAR	Villanueva del Arzobispo

Tabla 7.4: Designación de las estaciones de la red RAP

Desde sus inicios, esta red se ha visto afectada también por dos cambios de ubicación. Por un lado en 2008 la estación UCAD tuvo que instalarse en un edificio anexo debido a las obras de la nueva Facultad de Ciencias de la Universidad de Cádiz, cambio que no hizo variar su denominación. También durante 2010 las obras en la cubierta donde estaba instalada la estación de Granada (GRAN) afectaron a su emplazamiento, renombrándose la estación a GRA1 a partir de entonces. En la tabla 7.4 se muestra la denominación de las 22 estaciones así, como la nomenclatura de las mismas.

Respecto a la instrumentación, todas las estaciones cuentan con receptores capaces de emitir correcciones diferenciales con conexión permanente a internet. En este caso se eligieron los receptores del tipo Leica GRX1200 Pro que disponen

de antenas Choke Ring AT504 instaladas generalmente en mástiles de acero. Las estaciones de la primera fase cuentan además con estación meteorológica, radio-modem y un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI). Un aspecto importante de esta red a la hora de acceder a los datos es que no cuenta con una FTP para la descarga de los ficheros de observación, sino que es necesario rellenar un formulario de petición estándar en su web para poder acceder a los ficheros RINEX.

### 7.2.5. Red de la Comunidad Murciana (REGAM)

La Red de Geodesia Activa de Murcia (REGAM) cuenta con un total de 12 estaciones (Figura 7.9) distribuidas por el territorio de la Comunidad Murciana que comenzaron a dar servicio a mediados de 2008. Sus datos se pueden descargar a través del Portal Digital del Servicio de Cartografía de la Dirección General de Ordenación del Territorio de Murcia (CARTOMUR) (<http://cartomur.imida.es/regam/index.htm>) mediante web o FTP, sirviendo ficheros de observación RINEX con muestreos de 1, 5 y 30 segundos.

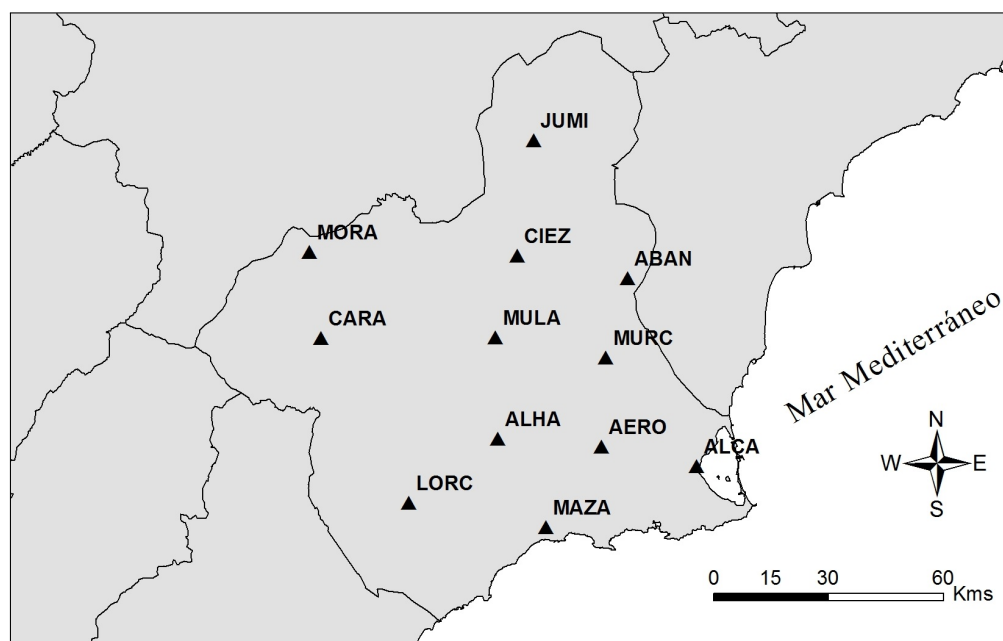


Figura 7.9: Distribución geográfica de las estaciones de la red REGAM

La red está compuesta de receptores Leica con capacidad de acceso a la señal GPS/GLONASS y antenas con choke-ring situadas en azoteas de edificios gubernamentales, a excepción de la estación de Moratalla (MORA) que se ubica en pilar hormigonado sobre superficie. Tiene además la capacidad de emitir correcciones diferenciales RTCM (correcciones estándar) mediante GPRS móvil e Internet TCP-IP con objeto de permitir posicionamiento diferencial de precisión.

De las estaciones de la red REGAM descritas en la tabla 7.5 algunas son de reciente implantación como es el caso del Aeropuerto de Corbera (AERO) y otras tienen una cohesión de datos intermitente como Cieza (CIEZ) y Alhama de Murcia (ALHA). Todas ellas siguen el objetivo de surtir de correcciones diferenciales a los usuarios, por lo que disponen de conexión permanente a internet para el envío de datos, aunque la continuidad de los datos para post-proceso no sea continua en algunas de ellas.

Estación	Descripción	Estación	Descripción
ABAN	Abanilla	JUMI	Jumilla
AERO	Aeropuerto de Corbera	LORC	Lorca
ALCA	Los Alcázares	MAZA	Mazarrón
ALHA	Alhama de Murcia	MORA	Moratalla
CARA	Caravaca de la Cruz	MULA	Mula
CIEZ	Cieza	MURC	Murcia

Tabla 7.5: Designación de las estaciones de la red REGAM

## 7.3. Elección de estaciones

### 7.3.1. Criterios de selección

Respecto a la selección de estaciones se tendrán en cuenta dos aspectos fundamentales. En primer lugar se optará por las estaciones que se encuentren más próximas a las zonas de estudio, el Archipiélago Balear y la parte más oriental de la Cordillera Bética. De este modo se considerarán las redes REGAM, ERVA y XGAIB en su totalidad y aquellas estaciones más orientales de la red RAP y red permanente EUREF situadas en la Península Ibérica.

En segundo lugar, y puesto que esta tesis doctoral busca estimar la velocidad mediante el análisis de series temporales de coordenadas, es necesario que existan unos criterios generales a aplicar para garantizar así una calidad en los procesados que repercutirá necesariamente en los resultados obtenidos. En relación a esto, una correcta homogeneidad y continuidad de las series son aspectos de importancia.

Para conseguir este objetivo se plantearon algunos condicionantes que se comentan a continuación:

- Las estaciones consideradas contarán con una monumentación estable. En ciertos casos la antena sufre movimientos diferenciales que no son debidos a la tectónica o a la deformación propia del lugar sino que están producidos por inestabilidades en la monumentación.

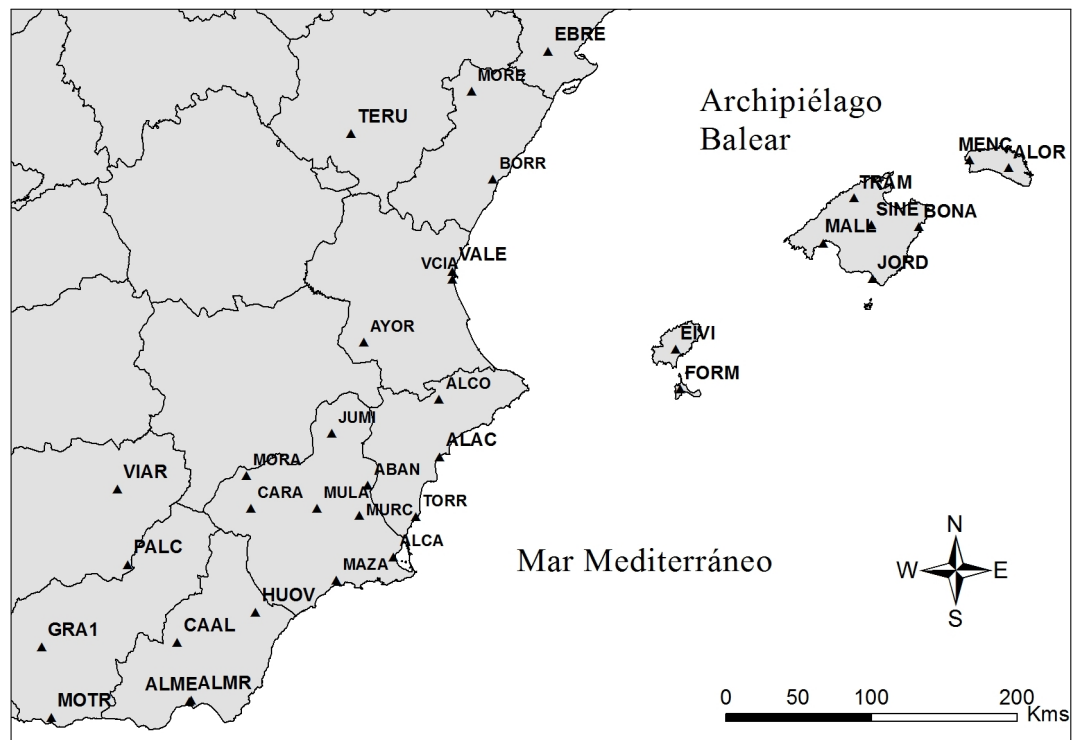


Figura 7.10: Distribución geográfica de las estaciones seleccionadas

- Se tendrá en cuenta una calidad en el horizonte de observación, evitando obstáculos que puedan degradar la señal que llega a la antena sometida a efectos como el multipath.
- El inicio del registro de observaciones debe ser lo suficientemente amplio como para abarcar varios años y evitar así periodicidades anuales y semi-anuales. Una serie temporal con un intervalo de dos años y medio o tres años de soluciones diarias da una estimación adecuada de la componente velocidad de la estación (Teferle et ál., 2007), por ello, solo se considerarán aquellas que cuenten con un intervalo de observaciones de esa magnitud y que no han sido instaladas recientemente.
- El registro de observaciones debe ser continuo. En ocasiones algunas redes por problemas eléctricos o de conexionado a internet sufren pérdidas de observaciones que se trasladaban a sus bases de datos. Aquellas redes cuyos problemas sean recurrentes o presentan inestabilidades no son aptas para la generación de series temporales de calidad.
- Se eliminarán aquellas estaciones con cambios de antena frecuentes o con un cambio de ubicación durante el período de estudio. La estabilidad de la serie temporal está relacionada con un número de offsets mínimo o nulo para evitar así saltos que afectarían a la estimación de la velocidad.

7.- Redes GNSS en las zonas de estudio

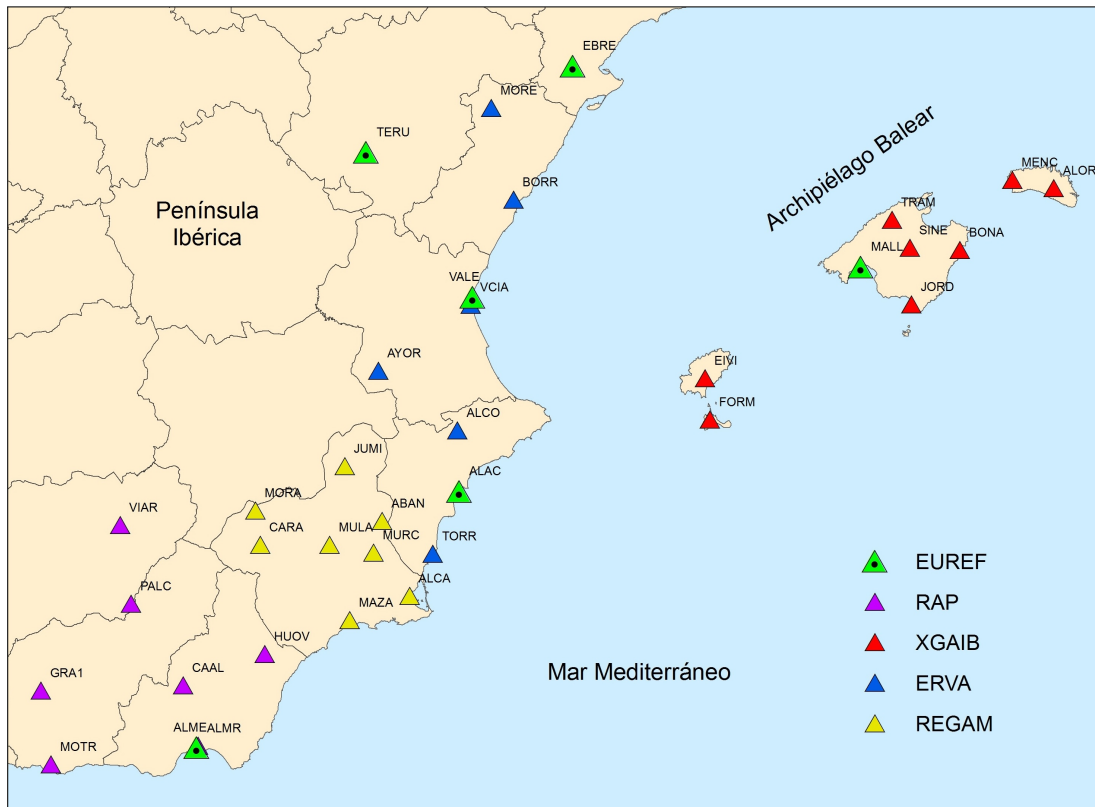


Figura 7.11: Estaciones seleccionadas según red de pertenencia

Tras aplicar estos criterios se eligieron un total de 34 estaciones de las disponibles en las redes permanentes de la zona (Figura 7.10 y Figura 7.11). En las tablas 7.6 y 7.7 se adjuntan las coordenadas cartesianas geocéntricas y geodésicas en el sistema de referencia ETRS89. En la tabla 7.8 se muestra la tipología de antenas y receptores con las que cuentan las estaciones seleccionadas. Solo Alicante (ALAC) y Valencia (VALE) sufrieron un cambio de antena en los últimos 3 años, aspecto que se tendrá en cuenta a la hora de generar las series temporales de coordenadas. Los datos de entrada de receptor y antena de cada estación se incluirán en los programas de procesado para tener en cuenta los offsets y excentricidades de la antena, así como el período de validez.

Estación	X	Y	Z	Red
ABAN	5019757.198	-92324.479	3920866.200	REGAM
ALAC	5009051.399	-42072.472	3935057.504	EUREF
ALCA	5050255.286	-75879.931	3881893.569	REGAM
ALCO	4984687.426	-41199.154	3966605.951	ERVA
ALME	5105220.295	-219278.803	3804386.889	EUREF
ALMR	5104673.974	-217597.900	3805329.629	RAP
ALOR	4884754.331	353584.317	4072521.187	XGAIB
AYOR	4958705.674	-91680.765	3998023.621	ERVA
BONA	4911590.177	291137.409	4045072.257	XGAIB
BORR	4899519.298	-7115.817	4069961.408	EUREF
CAAL	5081921.525	-226112.457	3838297.598	RAP
CARA	5027037.189	-172709.077	3910011.889	REGAM
EBRE	4833520.378	41536.838	4147461.305	EUREF
EIVI	4965341.134	121946.106	3988187.600	XGAIB
FORM	4982380.105	124271.548	3966899.862	XGAIB
GRA1	5077918.014	-319155.702	3834700.964	RAP
HUOV	5070413.844	-171934.990	3853104.551	RAP
JORD	4934530.114	258449.635	4019464.990	XGAIB
JUMI	4997066.054	-115637.442	3949588.979	REGAM
MALL	4919369.704	225499.577	4039849.606	EUREF
MAZA	5058844.449	-115728.341	3869850.755	REGAM
MENC	4881780.549	326920.339	4078080.694	XGAIB
MORA	5013378.945	-174968.177	3927817.859	REGAM
MOTR	5106803.442	-314181.536	3795723.027	RAP
MULA	5028272.168	-127177.635	3909243.426	REGAM
MURC	5032231.834	-98602.531	3904658.279	REGAM
PALC	5046810.771	-258521.907	3879916.978	RAP
SINE	4911221.918	258705.255	4047909.892	XGAIB
TERU	4867391.684	-95523.894	4108341.277	EUREF
TORR	5033805.382	-59823.084	3903319.520	ERVA
TRAM	4899860.129	247496.966	4062910.279	XGAIB
VALE	4929534.046	-29050.676	4033709.925	EUREF
VCIA	4932702.944	-29607.783	4029833.039	ERVA
VIAR	5014599.640	-263899.023	3920551.445	RAP

Tabla 7.6: Coordenadas cartesianas de las estaciones de las zonas de estudio en el sistema ETRS89 en metros. Se incluye la red a la que pertenecen

7.- Redes GNSS en las zonas de estudio

Estación	Latitud	Longitud	Altura elipsoídica	Red
ABAN	38° 10' 30.2165"	-1° 03' 13.2400"	207.776	REGAM
ALAC	38° 20' 20.1036"	-0° 28' 52.4370"	60.356	EUREF
ALCA	37° 43' 50.7536"	-0° 51' 38.8893"	67.368	REGAM
ALCO	38° 41' 52.7444"	-0° 28' 24.7693"	640.090	ERVA
ALME	36° 51' 09.1126"	-2° 27' 34.0188"	127.517	EUREF
ALMR	36° 51' 45.6004"	-2° 26' 27.1690"	198.770	RAP
ALOR	39° 56' 03.6858"	4° 08' 24.5409"	189.557	XGAIB
AYOR	39° 03' 40.8113"	-1° 03' 33.1646"	661.819	ERVA
BONA	39° 36' 49.2947"	3° 23' 32.1787"	57.367	XGAIB
BORR	39° 54' 18.6373"	-0° 04' 59.5685"	72.901	EUREF
CAAL	37° 13' 15.9239"	-2° 32' 51.3935"	2210.670	RAP
CARA	38° 02' 45.1691"	-1° 58' 03.6552"	902.454	REGAM
EBRE	40° 49' 15.1866"	0° 29' 32.4922"	107.812	EUREF
EIVI	38° 57' 04.2848"	1° 24' 24.7345"	132.165	XGAIB
FORM	38° 42' 18.9987"	1° 25' 43.6327"	99.628	XGAIB
GRA1	37° 11' 23.6392"	-3° 35' 47.0601"	823.270	RAP
HUOV	37° 24' 05.6154"	-1° 56' 31.6490"	352.210	RAP
JORD	39° 18' 53.7786"	2° 59' 53.4082"	57.529	XGAIB
JUMI	38° 30' 07.4480"	-1° 19' 32.3361"	610.156	REGAM
MALL	39° 33' 09.4453"	2° 37' 28.3831"	62.063	EUREF
MAZA	37° 35' 36.3860"	-1° 18' 37.7812"	105.111	REGAM
MENC	40° 00' 02.2122"	3° 49' 52.4323"	66.669	XGAIB
MORA	38° 14' 51.0921"	-1° 59' 55.7726"	1227.436	REGAM
MOTR	36° 45' 17.1472"	-3° 31' 13.8807"	166.970	RAP
MULA	38° 02' 27.9984"	-1° 26' 55.8431"	332.107	REGAM
MURC	37° 59' 24.5759"	-1° 07' 21.0757"	121.913	REGAM
PALC	37° 42' 08.4075"	-2° 55' 56.6478"	916.880	RAP
SINE	39° 38' 45.2459"	3° 00' 55.2446"	188.084	XGAIB
TERU	40° 21' 01.7902"	-1° 07' 27.4837"	956.187	EUREF
TORR	37° 58' 31.1290"	-0° 40' 51.1905"	57.109	ERVA
TRAM	39° 49' 06.3784"	2° 53' 29.8001"	606.122	XGAIB
VALE	39° 28' 50.9705"	-0° 20' 15.5434"	77.592	EUREF
VCIA	39° 26' 08.5455"	-0° 20' 38.0576"	62.951	ERVA
VIAR	38° 10' 03.4985"	-3° 00' 44.9163"	746.480	RAP

Tabla 7.7: Coordenadas geodésicas de las estaciones de las zonas de estudio en el sistema ETRS89 y red a la que pertenecen. Alturas definidas en metros

Estación	Receptor	Antena	Período
ABAN	LEICA GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2009/243
ALAC (*)	Trimble NETRS	TRM29659.00 NONE	2006/151-2010/258
ALAC (*)	Leica GR10	LEIAR25.R3 LEIT	Desde 2010/258
ALCA	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG LEIS	Desde 2009/243
ALCO	Trimble NETRS	TRM41249.00 NONE	Desde 2005/001
ALME	Trimble NETRS	TRM29659.00 NONE	desde 2007/036
ALMR	Leica GRX1200PRO	LEIAX1202 NONE	Desde 2006/059
ALOR	Leica GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2010/090
AYOR	Leica GRX1200GGPRO	LEIAX1202GG NONE	Desde 2007/120
BONA	Leica GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2010/090
BORR	Trimble R7	TRM29659.00 NONE	Desde 2005/117
CAAL	Leica GRX1200PRO	LEIAT504 LEIS	Desde 2006/305
CARA	LEICA GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2009/243
EBRE	Trimble NETRS	TRM29659.00 NONE	Desde 2005/320
EIVI	Leica GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2010/090
FORM	Leica GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2010/090
GRA1	Leica GRX1200PRO	LEIAT504 LEIS	Desde 2010/126
HUOV	Leica GRX1200PRO	LEIAX1202 NONE	Desde 2007/212
JORD	Leica GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2010/090
JUMI	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG LEIS	Desde 2008/243
MALL	Leica GRX1200GGPRO	LEIAT504GG LEIS	Desde 2008/304
MAZA	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG LEIS	Desde 2008/243
MENC	Leica GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2010/090
MORA	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG LEIS	Desde 2008/243
MOTR	Leica GRX1200PRO	LEIAX1202 NONE	Desde 2007/212
MULA	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG LEIS	Desde 2008/243
MURC	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG LEIS	Desde 2008/243
PALC	Leica GRX1200PRO	LEIAX1202 NONE	Desde 2009/273
SINE	Leica GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2010/090
TERU	Leica GRX1200GGPRO	LEIAT504GG LEIS	Desde 2008/066
TORR	Trimble NETRS	TRM29659.00 TCWD	Desde 2005/243
TRAM	Leica GRX1200+GNSS	LEIAR25 LEIT	Desde 2010/090
VALE (*)	Trimble NETRS	TRM29659.00 TCWD	2006/317-2010/258
VALE (*)	Leica GR10	LEIAR25.R3 LEIT	Desde 2010/258
VCIA	Leica GRX1200GGPRO	LEIAX1202GG NONE	Desde 2006/181
VIAR	Leica GRX1200PRO	LEIAX1202 NONE	Desde 2007/181

Tabla 7.8: Receptores y antenas de las estaciones de las zonas de estudio desde el año 2010. (\*) indica aquellas con cambio de antena



# 8

## Estimación de la velocidad y deformación en las zonas de estudio

---

*“Dividir cada una de las dificultades que examinase en tantas partes como fuera posible y como requiriese para resolverlas mejor”*

René Descartes (1596-1650)

En este capítulo se describe el proceso de cálculo para la obtención de los valores de velocidad y los modelos de deformación en el sector oriental de la Cordillera Bética y en el Archipiélago Balear. Para ello se utilizó el software de procesado PPP GIPSY-OASIS (GOA) con las datos RINEX pertenecientes a las 34 estaciones seleccionadas y distribuidas de manera homogénea en ambas zonas. El intervalo de tiempo escogido abarca un período de 3 años entre las fechas 2010/090-2013/243. Así mismo se planteó la validación de los resultados mediante el contraste con los valores generados a partir de otras aplicaciones PPP como fueron las versiones online APPS y CSRS-PPP y el script específico desarrollado en Bernese 5.0 (BSW).

Los fundamentos de cálculo incluyen, por un lado la estimación de las velocidades absolutas de las estaciones a partir del tratamiento de las series temporales de posiciones diarias y, por otro, la inferencia de los modelos de strains o esfuerzos para cada zona de estudio. Como apoyo a la interpretación de los resultados se utilizaron los datos de velocidad obtenidos a partir de un modelo de velocidad tectónica teórica que sirviera para deducir unas velocidades residuales propias de cada una de las estaciones.

El capítulo se centra en la descripción somera de las distintas fases de cálculo, preprocesado, procesado, determinación de velocidades y esfuerzos, para posteriormente enfocarse en la obtención de resultados numéricos y la representación gráfica asociada.

## 8.1. Fases de trabajo

### 8.1.1. Descarga y gestión de datos

En primer lugar se descargaron todos los datos necesarios para el proceso de cálculo comprendidos en el intervalo de tiempo 2010/090 - 2013/243, para ello se utilizó el programa del proyecto Filezilla (<https://filezilla-project.org/>), software libre y gratuito que permite la gestión de distintas FTP de manera sencilla y automática. A partir de las distintas direcciones se tuvo acceso a los ficheros RINEX de 24 horas y muestreo a 30 segundos de las estaciones, junto a los productos necesarios para el procesado tales como órbitas, estado de relojes y modelo ionosférico. La tabla 8.1 muestra un resumen de las direcciones FTP utilizadas.

Institución	FTP de descarga	Usuario	Contraseña
REGAM	<a href="ftp://62.14.244.61">ftp://62.14.244.61</a>	rinex1	rinex
ERVA	<a href="ftp://icvficheros.icv.gva.es">ftp://icvficheros.icv.gva.es</a>	ervaftp	ervaftp01
EUREF	<a href="ftp://igs.bkg.bund.de/EUREF/obs">ftp://igs.bkg.bund.de/EUREF/obs</a>	anonymous	anonymous
IGN	<a href="ftp://ftp.geodesia.ign.es/euref/obs">ftp://ftp.geodesia.ign.es/euref/obs</a>	anonymous	anonymous
IGS	<a href="ftp://igs.bkg.bund.de/IGS/products">ftp://igs.bkg.bund.de/IGS/products</a>	anonymous	anonymous

Tabla 8.1: Direcciones FTP de descarga de datos, productos y observaciones, así como las instituciones encargadas. Los datos de usuario y contraseña son públicos. Fuente: webs institucionales

Para los ficheros de observación de las redes XGAIB y RAP, donde el acceso no está habilitado directamente vía FTP, se procedió a la solicitud oficial y al envío automático de los datos desde SITIBSA, institución encargada de la explotación de la red en el Archipiélago Balear, y mediante petición directa a la web institucional de la Junta de Andalucía, en el caso de la red RAP.

Una vez descargados todos los ficheros la compresión más usual, y que siguen los repositorios de manera generalizada, es una compresión en formato ZIP. En primer lugar es necesario descomprimirlos con un software general y luego, para los ficheros de observación, descomprimir con Hatanaka mediante el programa `crx2rnx` (Hatanaka, 2008), para convertirlos así al formato RINEX usual en ASCII.

Tras ser organizados los ficheros, y preparados para el procesado con el software, se estudiaron los posibles problemas de cada una de las estaciones en el intervalo de tiempo considerado. En concreto, es importante aislar los cambios de antena de las estaciones, los problemas en el receptor y los fallos de recepción puntuales, todo ello con vistas a posibles cortes en la serie temporal y a la presencia de saltos que pudieran afectar a la estimación de la velocidad con el programa específico. Los problemas que se detectaron fueron los siguientes:

- Un cambio de antena en la fecha 2010/258 que afectó a las estaciones VALE y ALAC pertenecientes a la red EUREF.
- La ausencia de observaciones en las estaciones de la red REGAM durante el intervalo de tiempo 2012/062 hasta 2012/174.
- El registro de datos posterior a la fecha inicial 2010/090 que afecta a las estaciones TRAM y GRA1.

## **8.1.2. Procesado de la señal GPS**

Para el correcto procesado y gestión de las observaciones GPS, y debido a la ingente cantidad de información a tratar, fue necesario tener una dinámica de trabajo automática para poder gestionar toda la información disponible de manera eficiente. El uso de algoritmos y programas informáticos para el tratamiento integral de la información fue de vital importancia para una correcta estimación de todos los parámetros. A continuación se comentan las características de las distintas aplicaciones PPP online y software adaptados al proceso de cálculo.

### **8.1.2.1. Software GIPSY-OASIS**

Para el procesado con el software GOA se utilizó una máquina virtual LINUX donde estaba instalado el software GIPSY-OASIS 6.2, la versión más actual del programa de marzo de 2013. Debido a la necesidad de una automatización total del proceso para la estimación de la serie temporal de posiciones, se implementó un script automático que leía el fichero RINEX de una carpeta anexa, realizaba los cálculos y luego generaba un fichero de salida de coordenadas tipo stacov con los errores asociados.

El proceso se planteó de tal manera que el programa ejecutaba los cálculos estación por estación de manera independiente y sin intervención externa. A esto se le sumaba el hecho de que el software descargaba automáticamente la información de sus servidores ubicados en el JPL, lo que facilitaba todo el procedimiento.

Para la estimación se utilizó la secuencia de comandos `gd2p.pl` convenientemente adaptada para el posicionamiento puntual, según las especificaciones definidas en la documentación del software (Desai y Bertiger, 2012; Gregorius, 1996) (Tabla 8.2). En este caso se tuvieron en cuenta las características de un posicionamiento PPP tipo, con el modelo de la ionosfera y troposfera, la resolución de ambigüedades con la metodología GOA, el uso de un modelo de marea terrestre y carga oceánica FES2004 y la consideración del modelo de antena del receptor con el fichero ANTEX de IGS. Con todo ello, los parámetros que se adjuntaron al `gd2p.pl` en cada procesado PPP fueron los siguientes:

- **-r 300**: Índice de muestreo para el procesado. Por defecto 300 segundos.
- **-type s**: Tipo de procesamiento. En el caso de posicionamiento estático se define como "s" y para cinemático "k".
- **-w\_elmin 10**: Máscara de elevación para las observaciones. En este caso se especificó un valor de 10°.
- **-e "-a 20 -PC -LC -F"**: Uso de la fase LC, distancia PC y longitudes de arco de 20 minutos.
- **-pb\_min\_slip 100.0e-5**: Mínimo salto de  $10^{-5}$  kilómetros permitido entre pérdidas de fase.
- **-amb\_res 2**: Un total de 2 iteraciones para la resolución de ambigüedades con el fichero WLPB según la metodología definida en Bertiger et ál. (2010).
- **-dwght 1.0e-5 1.0e-3**: Ponderación de los datos de fase y distancia en kilómetros. Normalmente se utiliza  $LC = 1$  centímetro y  $PC = 1$  metro.
- **-post\_wind 5.0e-3 5.0e-5**: Ventana de observación de distancia y fase, por defecto 5 veces lo definido en el apartado **-dwght**.
- **-trop\_z\_rw 5.0e-8**: Parámetro para la estimación cenital de la troposfera. Valores negativos indican que no será estimada.
- **-tides WahrK1 FreqDepLove OctTid PolTid**: Modelos de marea terrestre a aplicar en la estación. GOA tiene por defecto el WahrK1 (Wahr, 1985) como subconjunto de los modelos FreqDepLove y PolTid.
- **-add\_ocnld**: Añade los coeficientes de carga oceánica al módulo qregres.nml del GOA y acompaña a la opción **OcnldCpn**.
- **-OcnldCpn**: Define el modelo de carga oceánica en base al fichero derivado de <http://holt.oso.chalmers.se/loading/>.
- **-AntCal"LEIAR25.xy"**: Especifica el fichero de antena que va a utilizarse para corregir el PCO. Los datos vienen del fichero IGSwww.I05 en formato ANTEX con la información del offset y la excentricidad.
- **-wetzgrad 5.0e-9**: Calcula los parámetros de gradiente de troposfera como retardo húmedo, El valor  $5.0e-9$  es el usual para la máscara de elevación elegida (Bar-Server et ál., 1998).
- **-trop\_map GMF**: Función de cartografiado de la troposfera. Se puede utilizar la función de Niell (Niell, 1996) o la GMF (Boehm et ál., 2006).
- **-shell\_height 600**: Altura de 600 kilómetros para la estimación del valor de TEC en la ionosfera

- **-tec\_md1 iri:** Modelo de estimación del TEC basado en la Ionosfera de Referencia Internacional IRI ([Bilitza, 2001](#)).
- **-stacov:** Generación de las salidas de coordenadas y desviaciones en un fichero estandar GOA de tipo stacov.

El programa a su vez genera una gran cantidad de ficheros auxiliares entre los que se pueden destacar los relativos a los datos de calibración de la antena (fichero de extensión \*.xyz), los de listado de datos de orientación terrestre (fichero `tpnml`) y el fichero asociado a la resolución de ambigüedades (`wlpb`).

Todos ellos son filtrados una vez concluido el proceso de cálculo con GOA para evitar una excesiva carga de información en el dispositivo de almacenamiento. De este modo, puesto que los datos incluidos en el fichero stacov son los que disponen de las coordenadas y errores asociados para las estaciones, el sistema automático realiza únicamente la copia de este fichero para su posterior lectura.

```
(gd2p.pl \
    -i /media/disco/datos \
    -n esta \
    -d año-mes-día \
    -r 300 \
    -type s \
    -w_elmin 10 \
    -e a 20 -PC -LC -F"\
    -pb_min_slip 100.0e-5 \
    -amb_res 2 \
    -dwght 1.0e-5 1.0e-3 \
    -post_wind 5.0e-3 5.0e-5 \
    -trop_z_rw 5.0e-8 \
    -tides WahrK1 FreqDepLove OctTid PolTid \
    -add_ocnld \
    -OcnldCpn \
    -AntCal "LEIAR25.xyz"\
    -wetzgrad 5.0e-9 \
    -trop_map GMF \
    -shell_height 600 \
    -tec_md1 iri \
    -stacov \
    >gd2p.log )
```

Tabla 8.2: Parámetros de entrada en el procesado con GIPSY-OASIS extraídos del script de automatización.

Los resultados del fichero stacov tienen la información que viene descrita en la figura 8.1 y explicada en [IGSMail-0844 \(1995\)](#). En la primera fila figura como

## 8.- Estimación de la velocidad y deformación en las zonas de estudio

---

cabecera el número de parámetros procesados y la fecha de observación, luego se incluyen las coordenadas cartesianas ajustadas con el error asociado al cálculo. Posteriormente, se muestran las correlaciones entre los parámetros y por último se indica la altura de antena para la estación.

```
3 PARAMETERS ON 13JUN01.
1 FORM STA X      0.498237978405597E+07 +- 0.186230682789123E-02
2 FORM STA Y      0.124271987817009E+06 +- 0.568443355896588E-03
3 FORM STA Z      0.396690019846369E+07 +- 0.139629515133626E-02
2   1   0.792964534507141E-01
3   1   0.818333968920313E+00
3   2   0.890345820004952E-01
FORM ANTENNA LC   0.0000      0.0000      0.0000      !up north east (m)
```

Figura 8.1: Extracto de fichero stacov del software GIPSY-OASIS.

### 8.1.2.2. Aplicación PPP del Bernese 5.0

A diferencia del software GOA, BSW no descarga de manera automática los ficheros que necesita para el procesado. El usuario es el que se encarga de disponer de ellos a través de las distintas FTP. En el caso concreto de este trabajo los datos se consiguieron a través de la dirección de la Universidad de Berna <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>, donde se alojan los ficheros utilizados en el BPE del PPP, junto a la información actualizada de apoyo para el software. En la tabla 8.3 se muestran los nombres y descripciones de estos ficheros.

Fichero	Descripción
CODWWW.CLK.Z	Correcciones del oscilador del satélite
CODWWW.ION.Z	Modelo de ionosfera
CODWWW.EPH.Z	Efemérides finales del satélite
CODWWW.ERP.Z	Posicionamiento del polo
P1C1YYMM.DCB.Z	Diferencias de código entre P1 y C1
P1P2YYMM.DCB.Z	Diferencias de código entre P1 y P2

Tabla 8.3: Ficheros de apoyo para el procesado PPP utilizado en el software BSW y descargados de la FTP de la Universidad de Berna. La variable WWW indica la semana GPS, YY los dígitos del año y MM el mes de la observación. Fuente: <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>

Una vez descargados los ficheros, se procedió al reparto de los mismos en cada una de las carpetas que componen la campaña de procesado tipo en BSW. La distribución se describe en la tabla 8.4 con el estado inicial de la campaña.

Originalmente la carpeta **STA**, que contiene información relevante de las estaciones, está compuesta antes del proceso por 4 ficheros: **PPP.BLQ**, que contiene la información de carga oceánica facilitada por el Observatorio de Onsala en la web

<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>; PPP.PLD, con la asignación de placa tectónica; SESSIONS.SES que sirve de información al programa para gestionar las sesiones de procesado según el intervalo de tiempo; y PPP.STA con los datos de receptor, antena, offsets de los mismos, incidencias e intervalo de validez. Este último fichero es análogo al de extensión SVEC del software GIPSY-OASIS.

Carpeta	Extensiones de los ficheros
ORB	ERP, EPH, DCB
STA	BLQ, PLD, STA, SES
OUT	CLK
ATM	ION
ORX	YYo (RINEX)
BPE,RAW,OBS,SOL	Vacías

Tabla 8.4: Distribución inicial de ficheros en el procesado BSW-PPP con las carpetas y extensiones. También se indican aquellas carpetas vacías al inicio del proceso

Respecto al procesado, BSW sigue una dinámica basada en la sesión de observación y no estación por estación como ocurría en GOA. Esto por un lado es una ventaja, ya que permite que los cálculos comunes para todas las estaciones no tengan que repetirse para todas ellas, pero tiene el inconveniente de que cualquier fallo en el procesado deshabilita la solución para todas las estaciones observadas en esa sesión.

Las principales características que se incluyen en la aplicación PPP-BSW son:

- Modelos IERS2000 y IAU2000 para los valores de movimiento del polo y nutación respectivamente.
- Modelo de potencial gravitatorio terrestre JGM3 en grado 12.
- Efemérides planetarias con el fichero DE200.
- Señal bifrecuencia L1 y L2 con medidas de fase.
- Intervalo de muestreo de 300 segundos para los datos RINEX y los ficheros de cálculo.
- Uso de una combinación lineal MW y de geometría libre para la detección y corrección de los saltos de ciclo.
- Detección de *outliers* mediante una combinación ionosfera libre.
- Uso del fichero ANTEX para las correcciones de los centros de fase de las antenas.
- Modelo Saastamoinen para la troposfera.

- Máscara de elevación para observaciones de 10 grados.
- Modelo Dry Niell y Wet Niell para la estimación de parámetros ZPD en su componentes húmeda y seca con un intervalo de 2 horas.
- Solución de red libre según un posicionamiento estático no diferencial.
- Inclusión de los valores DCB de los satélites y estimación de estos parámetros para el receptor.
- Modelo de carga oceánica mediante FES2004.
- Parámetros de troposfera específicos de las estaciones, offsets del reloj del receptor y valores de DCB no preeliminados en el módulo GPSEST.

El PCF original de la aplicación PPP-BSW disponía además de unos módulos que, por un lado, propagaban las coordenadas a la época de referencia siguiendo el modelo de velocidades NNR-NUVEL1A (DeMets et ál., 1994) y que, por otro, obtenía los modelos de ionosfera derivados de los valores DCB de los receptores. En este caso se modificó el PCF original para terminar con la estimación de coordenadas, ecuaciones normales y ficheros SINEX, obviando los dos últimos módulos, ya que no son utilizados en esta tesis doctoral y reducía el proceso de cálculo unos 5 minutos por sesión. Tal como viene definido en Hugentobler et ál. (2006), el hecho de elegir una solución de red libre en PPP-BSW, que permite una estimación de las coordenadas de las estaciones sin ningún constreñimiento ni datum, se plantea para propósitos de testeo.

```

-SOLUTION/EPOCHS
*-----
+SOLUTION/ESTIMATE
*INDEX TYPE CODE PT SOLN REF_EPOCH UNIT S ESTIMATED VALUE STD_DEV
1 STAX ABAN A 0001 13:063:43050 m 2 0.501975691611936E+07 .107976E-02
2 STAY ABAN A 0001 13:063:43050 m 2 -.923240421483306E+05 .661359E-03
3 STAZ ABAN A 0001 13:063:43050 m 2 0.392086655791302E+07 .780157E-03
4 STAX ALAC A 0001 13:063:43050 m 2 0.500905109585064E+07 .116245E-02
5 STAY ALAC A 0001 13:063:43050 m 2 -.420720298774180E+05 .675658E-03
6 STAZ ALAC A 0001 13:063:43050 m 2 0.393505784699945E+07 .817279E-03
    
```

Figura 8.2: Extracto de fichero SINEX del software BSW.

Al igual que el software GOA, BSW genera multitud de ficheros de los cuales, los que realmente importan para el desarrollo de este trabajo, son los que contienen las coordenadas cartesianas estimadas con la metodología y su error asociado. Esta información se encuentra en los ficheros SINEX resultado, como descripción en ASCII de los datos incluidos en las ecuaciones normales NQ0. Los ficheros SINEX tienen una primera parte donde se enumeran las estaciones que participan en el cálculo, descripción de las mismas, intervalos de observación antenas, receptores y centros de fase; luego se adjuntan las coordenadas aproximadas



### 8.1.3. Velocidades de referencia y modelos

#### 8.1.3.1. Procesado relativo semanal de EUREF

El mantenimiento de la red permanente EPN de EUREF se lleva a cabo a través de los diferentes centros de análisis europeos encargados a su vez de generar los distintos productos derivados de la red (Agria et ál., 2008). La combinación de las soluciones individuales permite la estimación de una solución combinada semanal EPN que es la que sirve de referencia para los usuarios. Estos resultados se dan en los sucesivos marcos de referencia que han estado vigentes a lo largo del tiempo a través de unas estaciones que reciben el nombre de fiduciales.

Las soluciones combinadas EPN están disponibles con un retardo aproximado de un mes y contienen los ficheros de solución del procesado en formato SINEX .SNX y ficheros descriptivos de sumario .SUM. Estos productos pueden ser descargados directamente por los usuarios desde una FTP anónima en la dirección <ftp://igs.bkg.bund.de/EUREF/products/>.

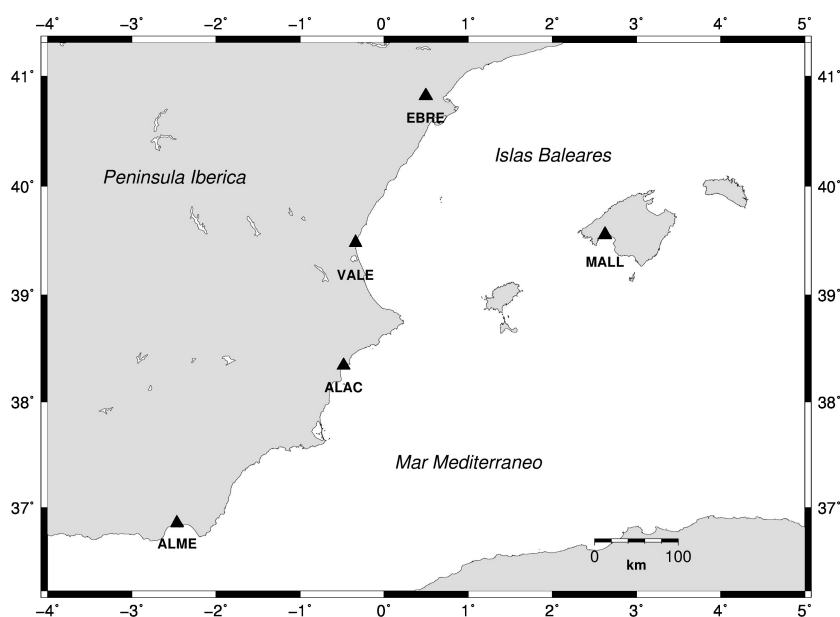


Figura 8.4: Distribución de las estaciones EUREF con serie temporal de coordenadas en las zonas de estudio superior a los 10 años

De las 34 estaciones distribuidas en las dos zonas de estudio, 6 de ellas pertenecen a la red EPN-EUREF, además de a sus respectivas redes regionales y nacionales. Las estaciones ALAC, ALME, EBRE, MALL y EBRE disponen a su vez de un procesado relativo ajustado a la red completa y una serie temporal de coordenadas con un intervalo de tiempo superior a los 10 años (Figura 8.4).

Esto facilita la obtención de una velocidad a partir de una metodología distinta al PPP, con una calidad perfectamente contrastada. En la tabla 8.5 se encuentran definidos los valores de velocidad para estos 5 vértices en base a estos procesados.

Un aspecto importante a tener en cuenta en estos cálculos es que el marco de referencia al que están referidas las coordenadas depende del marco vigente en el momento de observación. En este caso los tres marcos que afectan al procesado de coordenadas en época reciente son IGS05, IGS08 e IGB08 con los cambios definidos de IGS05 a IGS08 en la fecha 107/2011 y de IGS08 a IGB08 en 2012/281. Ambos cambios establecen un salto u offset en el desarrollo de la serie temporal.

### 8.1.3.2. Velocidad estimada a partir de la serie del JPL

Desde los inicios del software GIPSY-OASIS, y para el mantenimiento del mismo, el JPL ha estado procesando datos de numerosas estaciones distribuidas globalmente para generar las órbitas y productos que se adaptaban a los requerimientos de este programa. En la actualidad esta institución pone a disposición de los usuarios en la web <http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html> los datos del procesado de más de 2000 receptores analizados diariamente y que generan a su vez series temporales de posiciones y velocidades estimadas. La web dispone además de una FTP con las series temporales completas y los residuos, así como las amplitudes y errores de las periodicidades en estas estaciones.

Estación	Procesado relativo EUREF				Serie JPL		GEODVEL-NNR	
	E	N	$\sigma E$	$\sigma N$	E	N	E	N
ALAC	19.51	16.76	0.14	0.16	20.19	16.67	20.04	15.63
ALME	18.36	16.67	0.12	0.14	18.73	16.02	20.01	15.73
EBRE	19.35	15.96	0.13	0.12	19.80	15.91	19.69	15.57
MALL	19.79	16.56	0.11	0.11	19.76	16.33	20.32	15.42
VALE	19.46	16.33	0.16	0.16	19.75	16.12	19.82	15.62

Tabla 8.5: Velocidades de las estaciones ALAC, ALME, EBRE, MALL y VALE calculadas con procesado relativo semanal de EUREF en el intervalo 2009/001-365/2011, la serie temporal larga del JPL y el modelo teórico GEODVEL con condición NNR en mm/año

La metodología utilizada en el procesado de estas series temporales largas del JPL no difiere en líneas generales de la definida en el apartado 8.1.2.1 de esta tesis doctoral. Se incluye el modelo de carga oceánica FES2004, la función de cartografiado de la troposfera VMF1, las mareas y datos definidos en las notas del IERS (2010), las efemérides planetarias DE241, los modelos de centro de fase de las antenas del receptor y del satélite según lo definido en IGS y los datos orbitales y de reloj calculados para el software, entre otros parámetros. Cabe resaltar que las estaciones que participan en el cálculo de los ficheros de GOA

son la base de la estimación de ambigüedades que luego será utilizado para el procesado PPP (Bertiger et ál., 2010).

La información disponible, por tanto, es de gran utilidad como medio de comparación de resultados, ya que las velocidades y coordenadas estimadas por esta vía proceden de un procesado PPP con un software de referencia como es el GOA y además los datos están referidos de manera homogénea al marco de referencia IGS08. En la tabla 8.5 se incluyen las velocidades calculadas con la serie PPP del JPL correspondiente a los 5 vértices EUREF pertenecientes a las zonas de estudio y con una serie temporal de coordenadas superior a los 10 años.

Respecto a las desviaciones generales de todas las estaciones procesados por el JPL, el error estimado para las velocidades de cada componente viene descrito en la tabla 8.6, donde se comparan los RMS de las mejores 20, 200 y 400 estaciones procesadas para las componentes Este, Norte y Elevación:

GPS-ITRF2008	Mejores 20	Mejores 200	Mejores 400
Velocidad Norte (RMS)	0,1 mm/año	0,2 mm/año	0,4 mm/año
Velocidad Este (RMS)	0,1 mm/año	0,2 mm/año	0,4 mm/año
Velocidad Elevación (RMS)	0,1 mm/año	0,3 mm/año	0,6 mm/año

Tabla 8.6: Errores en las componentes horizontales y verticales de las series del JPL. Comparación en mm/año de las mejores 20, 200 y 400 estaciones procesadas en el JPL con GIPSY-OASIS

### 8.1.3.3. Modelo tectónico de velocidad

Los modelos tectónicos de placa son esenciales para proveer de un contexto espacio-temporal a los datos geológicos y geofísicos. Esto permite aislar los movimientos diferenciales de los puntos sobre la corteza terrestre, observar los procesos en el interior de la Tierra, deformación intraplaca y mecanismos que se encuentran detrás de los procesos geológicos (Seton et ál., 2012).

Las ecuaciones básicas utilizadas para la estimación de la velocidad angular de las placas tectónicas a partir de modelos teóricos están ligados al vector Euler de la placa  $\omega_p$ , al vector velocidad del punto considerado  $\dot{X}_i$  y al vector posición  $X_i$ , localizado en una placa determinada  $p$  (Altamimi et ál., 2012).

$$\dot{X}_i = \omega_p \times X_i \quad (8.1)$$

Al estimar todas las velocidades angulares de placa en su conjunto a partir de un campo de velocidad global, se puede añadir a la ecuación 8.1 un vector de traslación origen denominado  $\dot{T}$ , quedando la expresión del siguiente modo:

$$\dot{X}_i = \omega_p \times X_i + \dot{T} \quad (8.2)$$

donde la definición de velocidad sería dependiente de unas coordenadas de origen, denominadas comunmente polo Euler de la placa, y unas velocidades angulares ( $\omega$ ), que determinan la rotación de la misma.

Actualmente existen numerosos modelos que intentan reconstruir los desplazamientos tectónicos teóricos, pudiéndose clasificar éstos en varios grupos:

- **Modelos geológicamente actuales:** Aquellos basados en el desplazamiento actual de las placas tectónicas calculados a partir de medidas GPS (Argus y Hefin, 1995); geodesia espacial, como el modelo GEODVEL (Argus et ál., 2010); y una combinación de datos geológicos y medidas GPS, como pueden ser los modelos tipo NNR-NUVEL1, 1A y MORVEL (DeMets et ál., 2010).
- **Modelos tectónicos de placa tradicionales:** Que están basados en la interpretación de datos paleomagnéticos y estudios del fondo marino que reconstruyen las características de la corteza a partir de un marco de referencia absoluto. En este caso se encuentran ejemplos actuales de estos modelos en Golonka (2007); Schettino y Scotese (2005) y Müller et ál. (2008).
- **Modelos geodinámicos y de placa:** Que modelizan las localizaciones de los límites de placa y la densidad del manto para predecir los desplazamientos desde el pasado (Conrad y Lithgow-Bertelloni, 2002; Stadler et ál., 2010).

Los modelos de placa *Geologically current* son los que proveen de una representación más precisa a la hora de definir los movimientos globales de placa (DeMets et ál., 2010), encontrándose definidos en varios marcos de referencia globales y pudiéndose comprobar mediante distintas observaciones. Se encuentran, sin embargo, limitados temporalmente a las velocidades registradas en la actualidad.

De los desarrollados en este grupo los modelos más destacados actualmente son GEODVEL y MORVEL. El modelo GEODVEL se obtiene a partir de observaciones con diferentes técnicas como DORIS, GPS, SLR y VLBI (Argus et ál., 2010) y asume como origen el centro de masas de la Tierra sólida. En este modelo las indeterminaciones en las velocidades de placa están relacionadas con las indeterminaciones en la posición y velocidad de este centro de masas. Respecto al modelo MORVEL, se determina principalmente por la transformación de acimutes y por la intervención de las anomalías magnéticas marinas en el cálculo. En este modelo, las indeterminaciones están relacionadas con las diferencias de desplazamiento en las anomalías magnéticas.

Para la selección del modelo que mejor se ajustara a la velocidad real en las zonas de estudio se tuvo en cuenta la combinación de técnicas de geodesia espacial

que disponía el modelo GEODVEL a diferencia de MORVEL (Argus et ál., 2010); la mejor estimación del centro de masas de la Tierra que determina GEODVEL a diferencia de otros también espaciales como ITRF2005 e ITRF2008, con errores detectados en el origen del marco ITRF2005 de hasta 1,2 mm/año en dirección del eje Z; y el buen comportamiento del modelo GEODVEL en la zona estable de Eurasia, donde las velocidades residuales son casi nulas. Por todo ello se decidió elegir este último modelo para establecer la comparativa de velocidades.

Para obtener las velocidades teóricas existen diversas aplicaciones online en las que tras una entrada de coordenadas geodésicas o cartesianas geocéntricas, se facilita una estimación de velocidad en el modelo elegido. En el caso de este trabajo se ha hecho uso de la aplicación *plate motion calculator* que se encuentra alojada en la web <http://www.unavco.org>. Esta aplicación permite establecer el modelo entre los disponibles (Tabla 8.7), si se quiere especificar un marco de referencia NNR e, incluso, definir una velocidad angular de referencia personalizada mediante las coordenadas geodésicas y velocidades cartesianas del Polo Euler de una placa. Entre los formatos de salida disponibles estarían las velocidades cartesianas (XYZ), geodésicas locales (ENU) y en formato `psvelo`, característico del software GMT.

Modelo	Año	Modelo	Año
GEODVEL	2010	ITRF2000 v2002	2002
MORVEL	2010	HS3-NUVEL 1A	2002
APKIM2000	2005	APKIM2000	2000
GSRM v1.2	2004	ITRF2000 v2001	2001
CGPS	2004	HS2-NUVEL 1A	1994
REVEL	2000	NUVEL 1 y 1A	1991-94

Tabla 8.7: Modelos tectónicos disponibles en la página web de UNAVCO

Las velocidades del modelo GEODVEL con condición NNR, obtenidas de la página web de UNAVCO para los 34 vértices distribuidos en el sector oriental de la Cordillera Bética y el Archipiélago Balear, se presentan en la tabla 8.10.

#### 8.1.4. Generación de series temporales

Una vez procesadas las estaciones durante el período de estudio, el siguiente paso fue la lectura de los distintos ficheros resultado de cada uno de los programas y aplicaciones. En concreto los ficheros con información relevante serían los `stacov`, `SINEX` y resultados online. Debido a la ingente cantidad de datos a tener en cuenta, en la mayoría de los casos 3 coordenadas y 3 errores por fichero de cálculo, se implementó una serie de algoritmos basados en *MatLab*® para leer y gestionar

de manera automática esta información. El algoritmo principal agrupaba en un solo fichero el listado de coordenadas cartesianas geocéntricas, uno por estación, para cada sesión de procesado, software y servicio.

Posteriormente, las coordenadas cartesianas geocéntricas fueron transformadas a coordenadas horizontales (Este, Norte, Elevación). Para ello se utilizaron unas coordenadas cartesianas de referencia  $(x_r, y_r, z_r)$  que correspondían al primer punto de la serie temporal procesada. A partir de aquí se estimaron unas coordenadas geodésicas  $(\phi_p, \lambda_p)$  a introducir en las ecuaciones siguientes para obtener las componentes  $(e, n, u)$  (Drake, 2002):

$$\phi_p = -\arctg\left(\frac{z_r}{\sqrt{x_r^2 + y_r^2}}\right) \quad \lambda_p = \arctg\left(\frac{y_r}{x_r}\right) \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} e &= \text{sen}(\lambda_p)\Delta X + \text{cos}(\lambda_p)\Delta Y \\ n &= -\text{sen}(\phi_p)\text{cos}(\lambda_p)\Delta X - \text{sen}(\phi_p)\text{sen}(\lambda_p)\Delta Y + \text{cos}(\phi_p)\Delta Z \\ u &= \text{cos}(\phi_p)\text{cos}(\lambda_p)\Delta X + \text{cos}(\phi_p)\text{sen}(\lambda_p)\Delta Y + \text{sen}(\phi_p)\Delta Z \end{aligned} \quad (8.4)$$

$$\begin{aligned} \Delta X &= x - x_r \\ \Delta Y &= y - y_r \\ \Delta Z &= z - z_r \end{aligned} \quad (8.5)$$

Una vez pasado el listado de coordenadas a horizontales, y representada la serie temporal en una hoja de cálculo estándar, se procedió a un filtrado de los puntos que, por diversas causas, presentaban una desviación elevada respecto a la tendencia general. Para ello se aplicó un filtro iterativo simple en el que se eliminaban aquellos puntos que superaban la desviación de un centímetro respecto a la tendencia lineal de la serie. Esto permitía, por un lado, eliminar los *outliers* y errores groseros propios de un procesamiento continuo y, por otro, respetar el ruido y la variabilidad intrínsecos de la serie temporal y la metodología.

### 8.1.5. Estimación de velocidad de las estaciones

Para la estimación de los valores de velocidad a partir de las series temporales de coordenadas se utilizó el software de tratamiento CATS (Williams, 2008). Este programa permite, no sólo la obtención del valor de pendiente según una regresión lineal, sino también la introducción de magnitudes de periodicidad a diferentes intervalos para modelizar los factores estacionarios que afectan al movimiento propio de los puntos.

Este software trabaja en entorno LINUX y se fundamenta en una serie de sentencias en línea de comandos donde se le pasa la información de periodicidad,

el fichero de entrada y la denominación del fichero de salida. La orden general que se le pasó al software CATS para la determinación de la velocidad en cada estación fue la siguiente:

```
./cats esta.txt -sinusoid 13.66d -A1y1 -BM -O esta.out
```

donde “*esta.txt*” es el fichero de serie temporal de entrada de la estación tal como viene descrito en la figura 6.7; “*esta.out*”, es el fichero de salida con los resultados de velocidad, periodicidad y errores asociados; “-BM” define el método de máxima verosimilitud MLE como ajuste de la serie temporal y “-sinusoid 13.66d -A1y1” establece los armónicos a modelizar, que en este caso serían los de período anual, semianual y de la mitad del mes trópico lunar de 13,66 días (Teferle et ál., 2007).

Junto a las velocidades absolutas, y para una mejor interpretación de los resultados, se calculó también la diferencia con las velocidades teóricas derivadas del modelo tectónico GEODVEL (Argus et ál., 2010) con condición NNR. De este modo se añadían al estudio general unas velocidades residuales que ponían de manifiesto los desplazamientos diferenciales de las estaciones respecto al modelo.

### 8.1.6. Estimación de la deformación

Como complemento al mapa de velocidades absolutas y residuales, se procedió a la estimación de los parámetros de esfuerzo y su representación gráfica en las zonas de estudio del Archipiélago Balear y el sector oriental de la Cordillera Bética. Para ello se dispuso del software GRID-STRAIN (Teza et ál., 2008) desarrollado específicamente para uso científico y que se distribuye en entorno *MatLab*®. Esta aplicación permite el cálculo de una manera sencilla del campo de deformaciones 2D y 3D para una región determinada en base al campo de velocidades previo y sus errores asociados. El software puede ser utilizado para velocidades provenientes de cualquier fuente, siempre y cuando la estructura del fichero de entrada se atenga al formato requerido.

En el caso concreto de esta tesis doctoral, se hará uso exclusivamente del módulo bidimensional 2D para generar los mapas de esfuerzo. La dinámica de cálculo del programa parte de la definición de una malla regular que se superpone a los vértices con velocidad calculada previamente. A partir de aquí el software permite editar tanto los límites como el paso de malla siguiendo un proceso de cálculo iterativo mediante aproximación por mínimos cuadrados. Para el formato de entrada de los ficheros de velocidad se especifica que las coordenadas estén en una proyección cartográfica (en nuestro caso UTM) y que las velocidades se expresen en formato horizontal (Este/Norte) junto a los errores.

Un aspecto importante es el factor de escala, que tiene una función en el cálculo semejante a la que desempeñaría un filtro de paso bajo. A mayor magnitud de este factor, el programa obtiene una mayor superficie de cálculo con buen nivel de significación. Esto que en un principio podría ser deseable, va en detrimento de la calidad y el detalle del cálculo, al generar una distribución de esfuerzos más homogénea que elimina los detalles característicos. Por defecto el factor de escala en el programa tiene una magnitud tres veces superior al paso de malla especificado, aunque este valor puede ser editable en cualquier momento.

Una vez definido el fichero de entrada, los puntos excluidos del cálculo, las características del mallado y el factor de escala o suavizado a aplicar, GRID-STRAIN comienza a generar las salidas gráficas como ventanas emergentes de *MatLab*<sup>©</sup>. A continuación se muestra una breve descripción de las mismas:

- **Strains calculados en los puntos del mallado:** Donde se reflejan los esfuerzos obtenidos para cada nodo de la malla representando las compresiones y extensiones con flechas de color rojo y azul respectivamente.
- **Mapa de contorno de esfuerzos:** Con la distribución de los grados de esfuerzo de manera continua en todo el mallado. Los cálculos son obtenidos a partir de la suma de los valores característicos máximo ( $e_{max}$ ) y mínimo ( $e_{min}$ ) para cada nodo y la fórmula a utilizar sería  $e_{max} + e_{min}$ .
- **Mapa de contorno de esfuerzos normalizados:** Basado en el mapa de contorno de esfuerzos con los valores recalculados mediante la expresión  $(e_{max} - e_{min}) / (e_{max} + e_{min})$ . Los valores cercanos a cero indican tensores con componentes equiparables en módulo mientras que valores  $+1 / -1$  son característicos de la predominancia de una de las componentes.
- **Mapa de contorno con las prevalencias de los valores:** En el que se describe cual es el valor absoluto que predomina en el tensor, ya sea compresivo o extensivo. Esta salida es parecida a la obtenida en el mapa de contorno de los esfuerzos.
- **Mapa de errores:** Donde figura la distribución bidimensional de los errores derivados del cálculo de strains para cada uno de los nodos.
- **Mapa de valores significativos:** Esta salida caracteriza los puntos de entrada dependiendo de la distancia de los mismos con el nodo más cercano. Esto se relaciona a su vez con el factor de escala definido al inicio del cálculo.

Otro aspecto importante que posee el programa es que tiene la posibilidad de obtener los valores de los tensores de esfuerzo para cada punto. Este proceso lo lleva a cabo con el valor del nodo más cercano, añadiéndole el error asociado en el cálculo. Las magnitudes usuales estarían en nstrain/año.

## 8.2. Comprobación de la metodología

Como paso previo a la obtención del campo de velocidades definitivo se planteó una primera comprobación de la metodología PPP en base a las distintas opciones de procesamiento disponibles, esto permitió la validación de los parámetros calculados posteriormente. Para esta comprobación se tomaron los ficheros de observación RINEX correspondientes a las 5 estaciones pertenecientes a la red EPN-EUREF y que contaban con un intervalo de observación de más de 10 años: ALAC, ALME, EBRE, MALL y VALE (Figura 8.4). El intervalo de procesamiento para esta comparación se fijó entre las fechas 2009/001 y 365/2011, sumando un total de 1095 sesiones distribuidas a lo largo de 3 años.

Estación	APPS				CSRS-PPP			
	E	N	$\sigma E$	$\sigma N$	E	N	$\sigma E$	$\sigma N$
ALAC	19.41	16.24	0.20	0.13	18.66	16.70	0.11	0.10
ALME	18.71	16.10	0.13	0.07	17.81	17.06	0.16	0.14
EBRE	20.29	15.54	0.14	0.09	19.03	16.02	0.19	0.13
MALL	20.02	15.98	0.10	0.06	19.11	16.95	0.14	0.12
VALE	18.96	15.87	0.21	0.12	18.44	16.68	0.19	0.15

Tabla 8.8: Velocidades de las estaciones ALAC, ALME, EBRE, MALL y VALE calculadas con los aplicaciones online APPS y CSRS-PPP en el período 2009/001-2011/365 en mm/año

Para el procesamiento de los ficheros RINEX se utilizaron, por un lado, las aplicaciones PPP online APPS y CSRS-PPP y, por otro, los programas GIPSY-OASIS y la aplicación PPP del Bernese 5.0. El objetivo no es otro que tener una visión general de las distintas opciones de estimación de coordenadas en serie temporal para el cálculo de velocidad. Como contraste de resultados se consideraron además los datos provenientes del procesamiento semanal de la red EPN-EUREF, las velocidades estimadas por el JPL a partir de sus series temporales y la velocidad del modelo teórico GEODVEL con condición NNR.

Estación	GIPSY-OASIS 6.2				PPP Bernese 5.0			
	E	N	$\sigma E$	$\sigma N$	E	N	$\sigma E$	$\sigma N$
ALAC	20.05	16.13	0.10	0.10	19.18	16.95	0.28	0.17
ALME	18.97	16.17	0.06	0.06	18.66	16.66	0.18	0.11
EBRE	19.93	15.80	0.08	0.07	19.32	15.80	0.12	0.20
MALL	19.86	16.25	0.06	0.08	19.70	16.43	0.17	0.11
VALE	19.65	16.02	0.11	0.11	19.05	16.57	0.27	0.16

Tabla 8.9: Velocidades de las estaciones ALAC, ALME, EBRE, MALL y VALE calculadas con los programas GIPSY-OASIS y la aplicación PPP del Bernese 5.0, en el período 2009/001-2011/365 en mm/año

El registro de los cambios de antena que sufren las estaciones VALE y ALAC en la época 2010,78356 es un aspecto a tener en cuenta. La inclusión de estos saltos en la serie temporal es importante a la hora de obtener la velocidad con el software CATS ya que añade un parámetro más a la expresión analítica de la serie. Respecto al software BSW, la necesidad de calcular las coordenadas en los distintos marcos de referencia vigente IGS05 e IGS08 fue solventado mediante una transformación de coordenadas con el mismo programa para homogeneizar las salidas. El paso de todos los resultados al marco IGS08 evitaba posibles nuevos offsets e incertidumbre en la estimación de velocidad.

En las tablas 8.8 y 8.9 se adjuntan de manera resumida las velocidades absolutas de los vértices considerados con los errores en mm/año. Los resultados estarían en el marco IGS08 para los programas PPP e ITRF2008 para las aplicaciones online. Las series temporales con la comparación de todas las aplicaciones se adjuntan entre las figuras 8.5 y 8.9. Las representaciones con las velocidades absolutas y residuales considerando el modelo teórico GEODVEL con condición NNR pueden consultarse en las figuras 8.11 y 8.13.

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

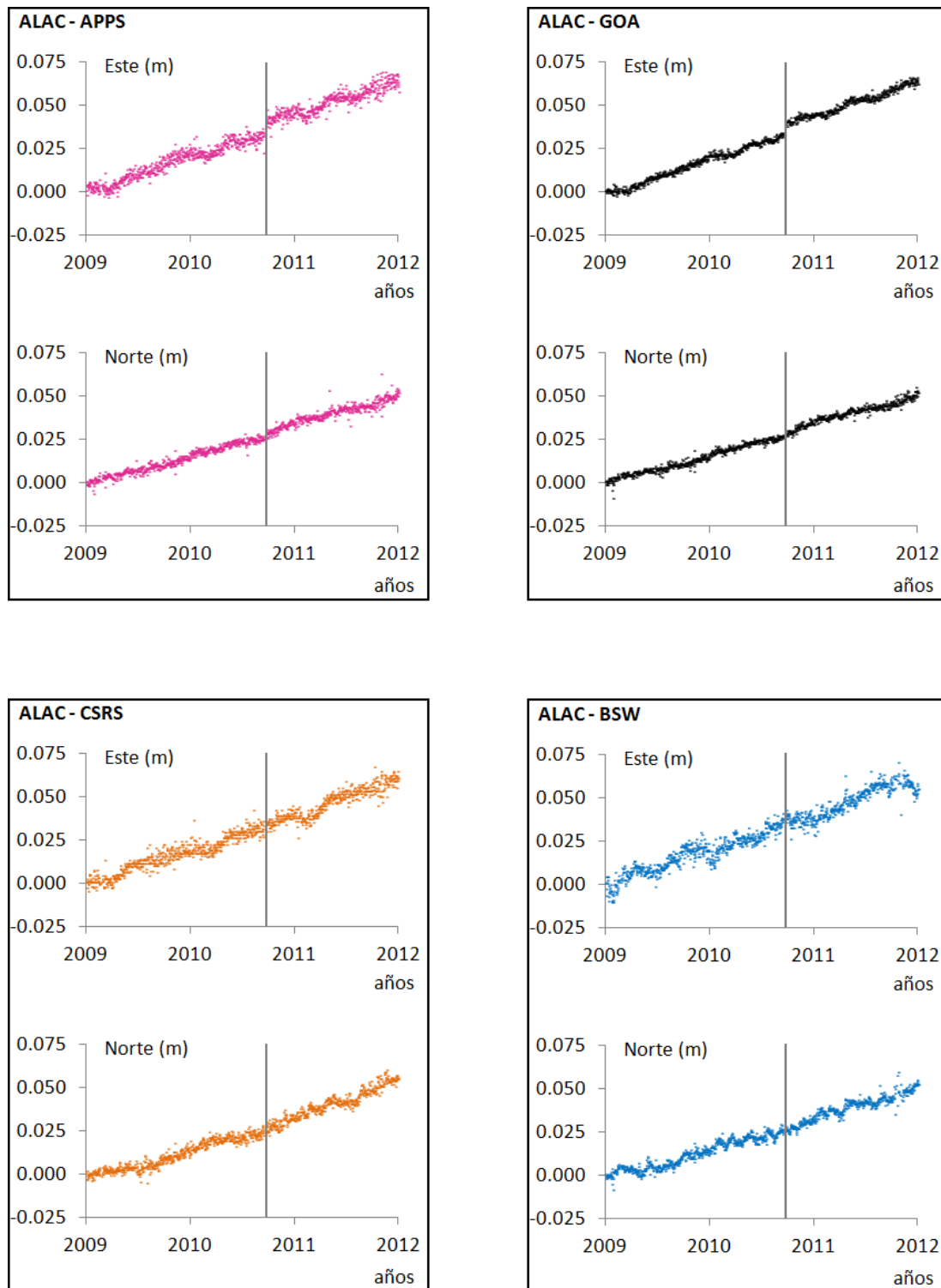


Figura 8.5: Series temporales de comprobación para la estación ALAC en el intervalo 2009/001 hasta 2011/365, con aplicaciones PPP online APPS y CSRS y programas GOA y BSW. Se muestra el cambio de antena que afecta a la estación

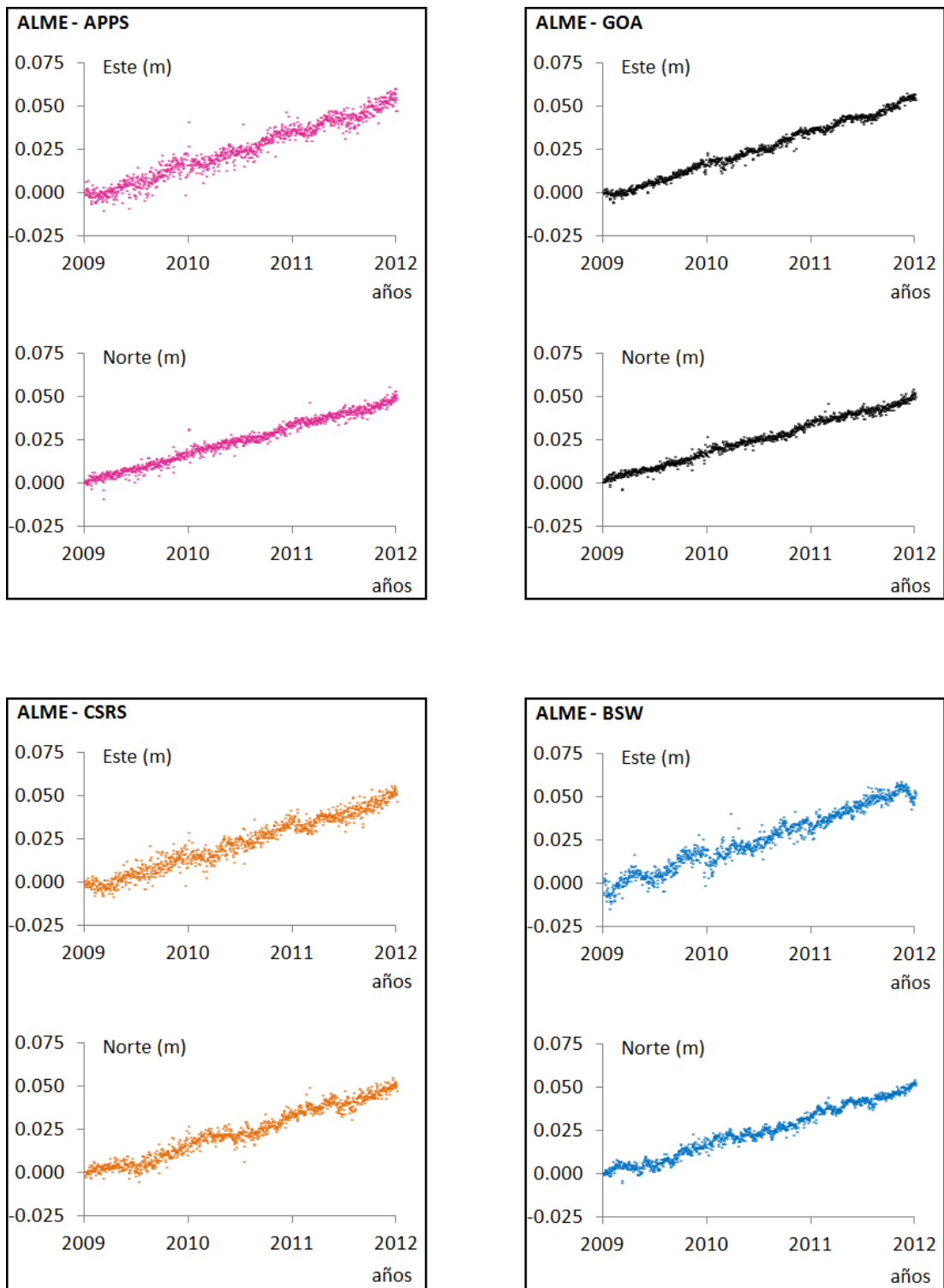


Figura 8.6: Series temporales de comprobación para la estación ALME en el intervalo 2009/001 hasta 2011/365, con aplicaciones PPP online APPS y CSRS y programas GOA y BSW

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

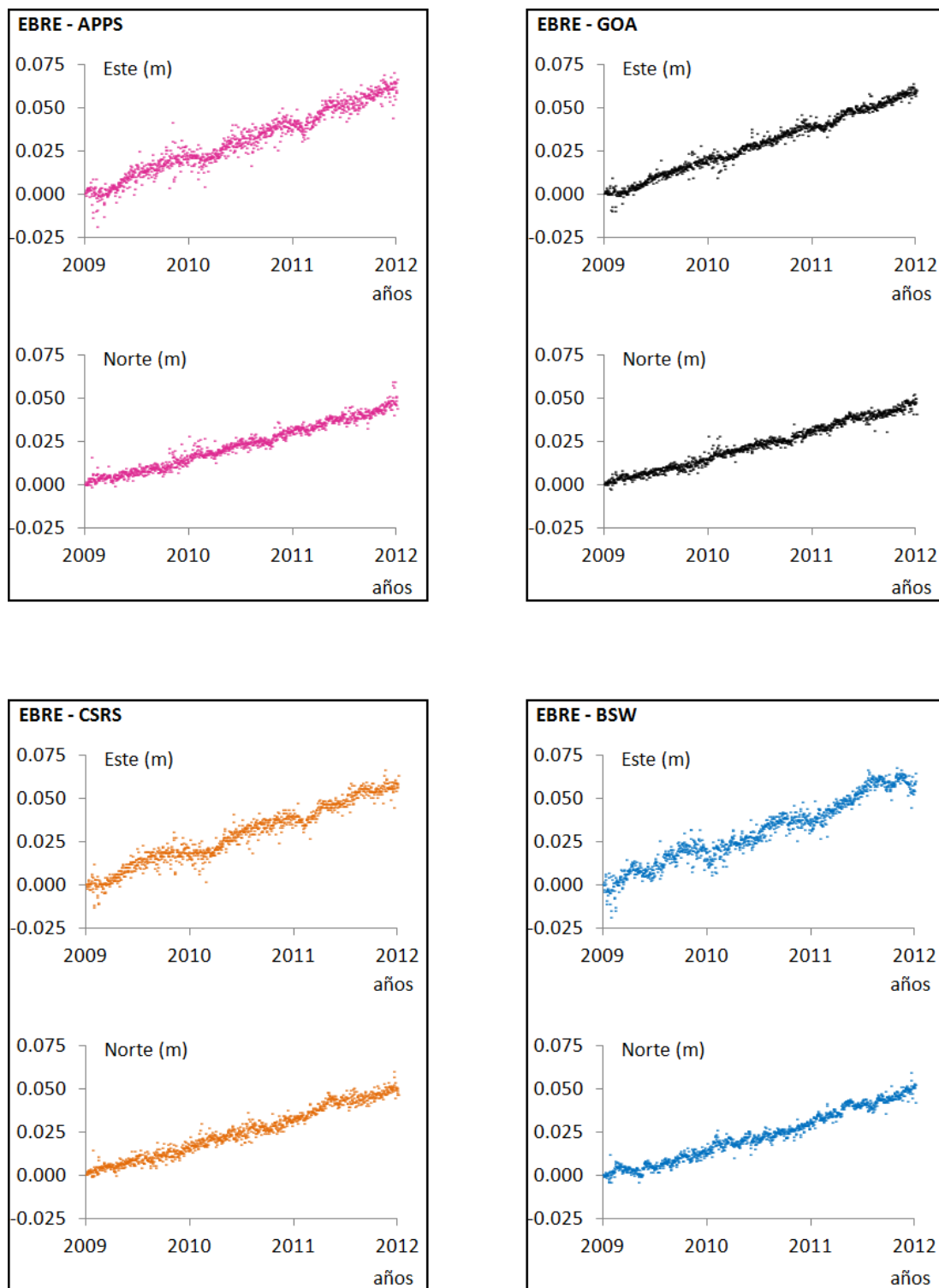


Figura 8.7: Series temporales de comprobación para la estación EBRE en el intervalo 2009/001 hasta 2011/365, con aplicaciones PPP online APPS y CSRS y programas GOA y BSW

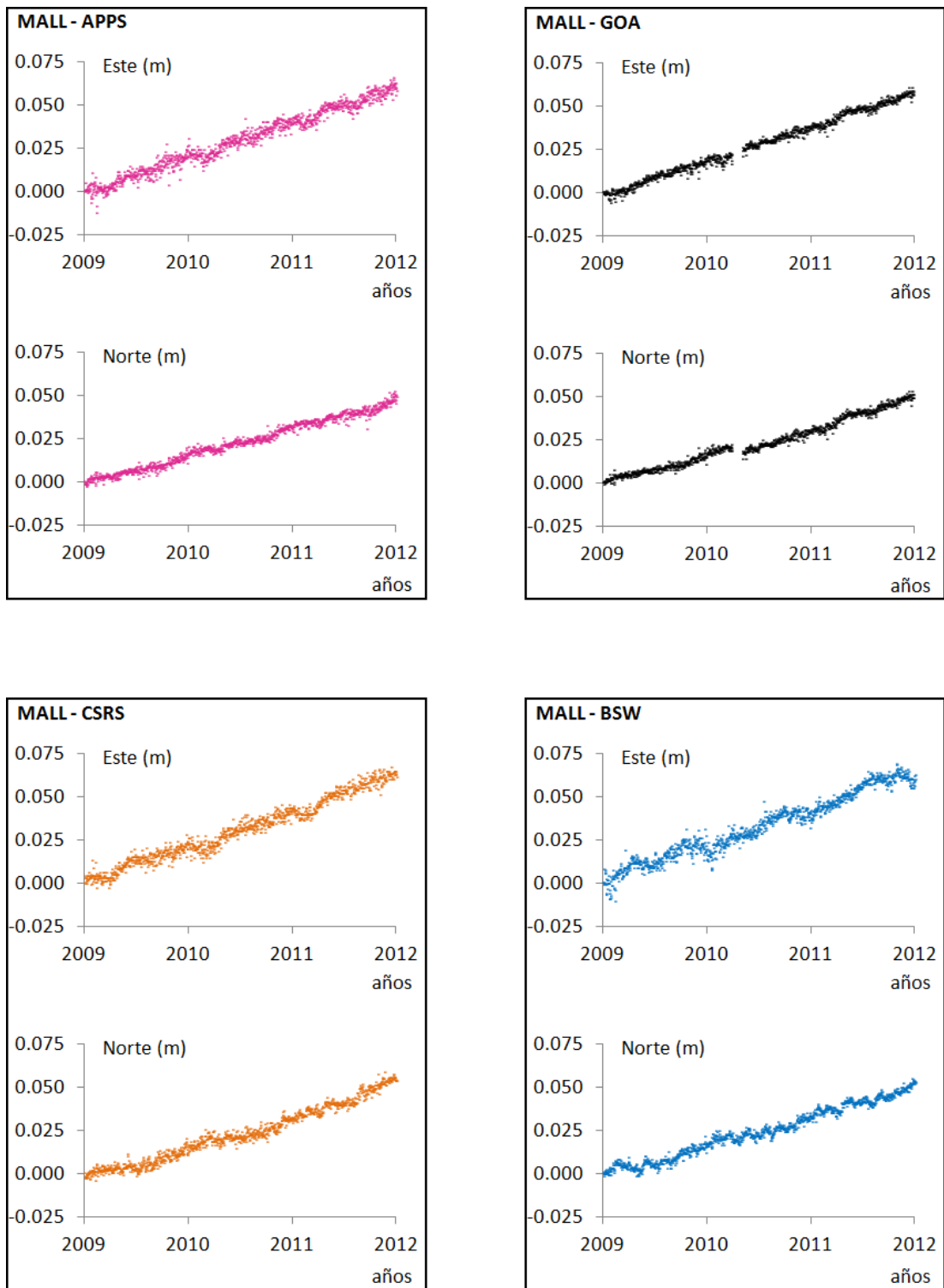


Figura 8.8: Series temporales de comprobación para la estación MALL en el intervalo 2009/001 hasta 2011/365, con aplicaciones PPP online APPS y CSRS y programas GOA y BSW

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

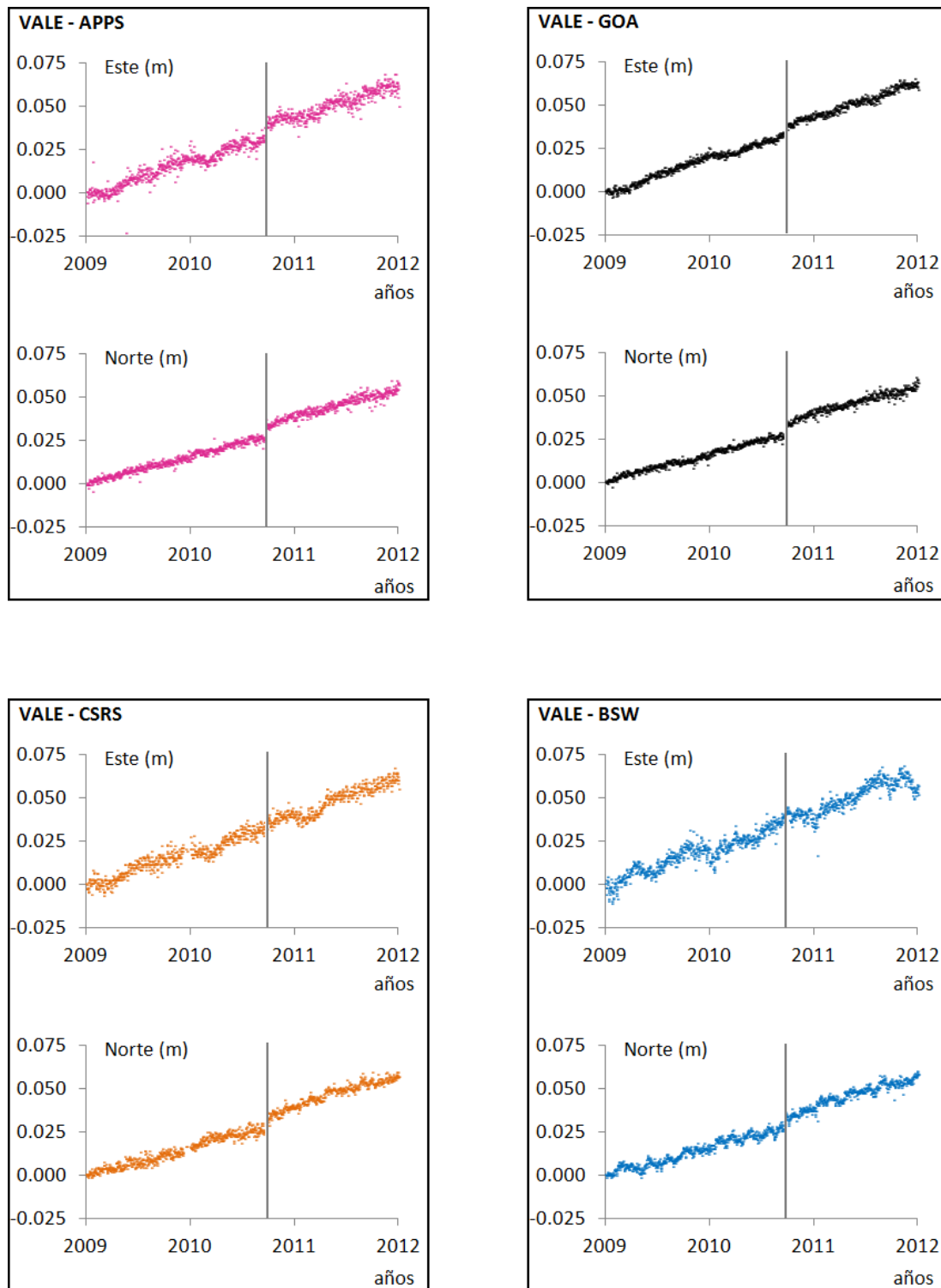


Figura 8.9: Series temporales de comprobación para la estación VALE en el intervalo 2009/001 hasta 2011/365, con aplicaciones PPP online APPS y CSRS y programas GOA y BSW. Se muestra el cambio de antena que afecta a la estación

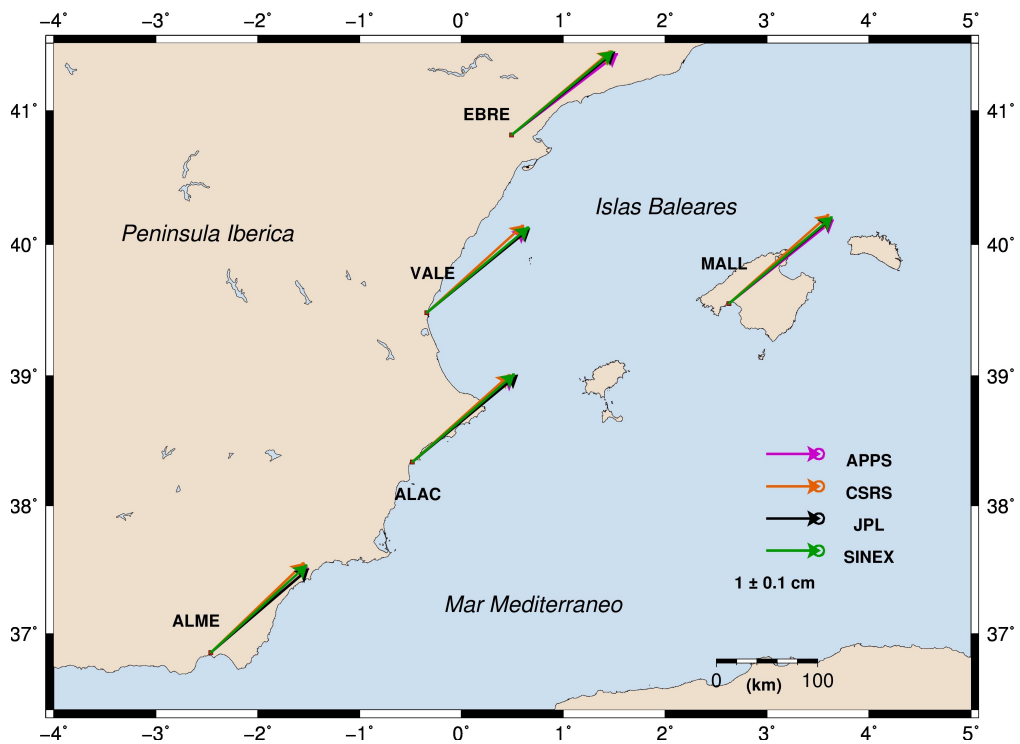


Figura 8.10: Vectores de velocidad absoluta obtenidos con las aplicaciones PPP online APPS y CSRS-PPP

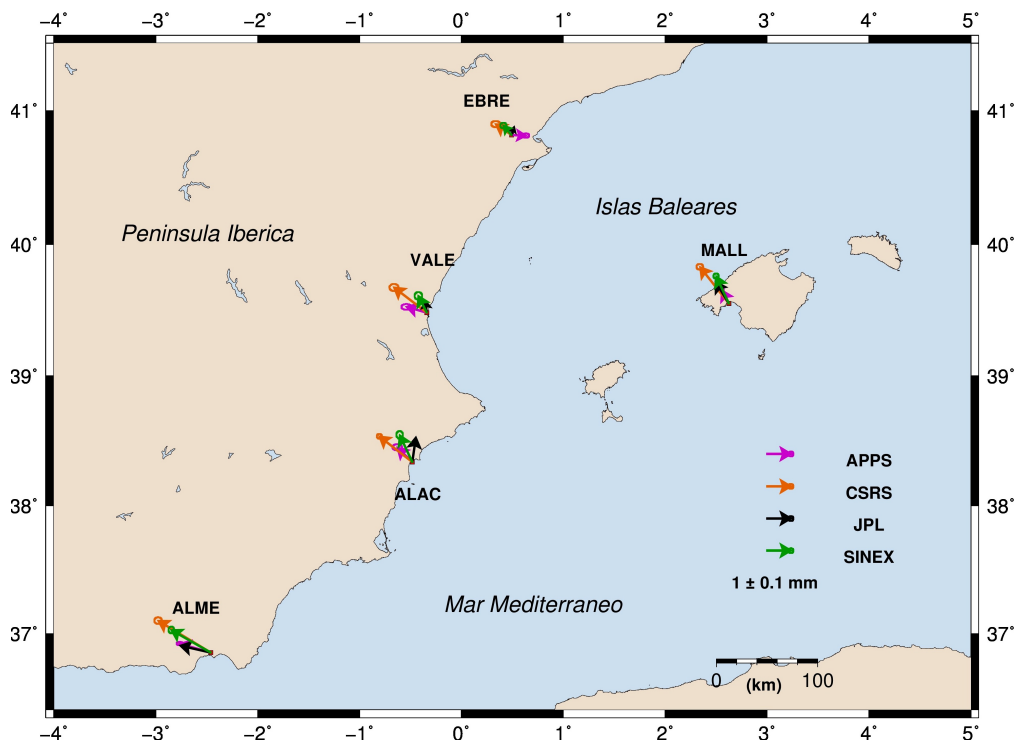


Figura 8.11: Vectores de velocidad residual respecto al modelo GEODVEL bajo condición NNR obtenidos con las aplicaciones PPP online APPS y CSRS-PPP

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

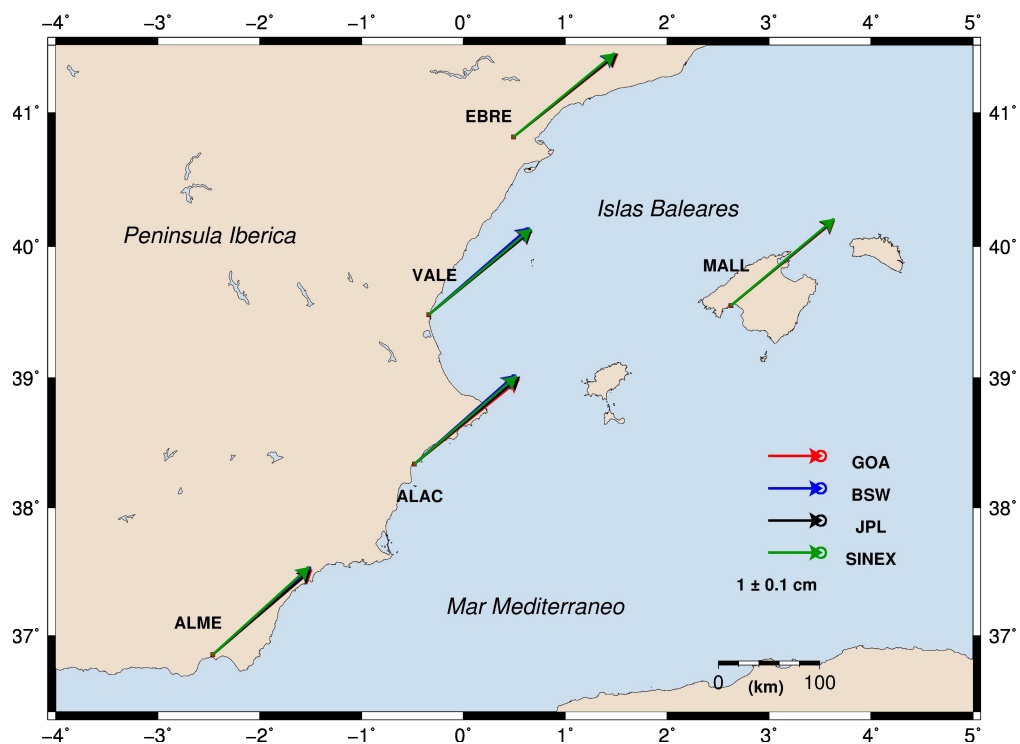


Figura 8.12: Vectores de velocidad absoluta obtenidos con la aplicación PPP del BSW y con el software GOA

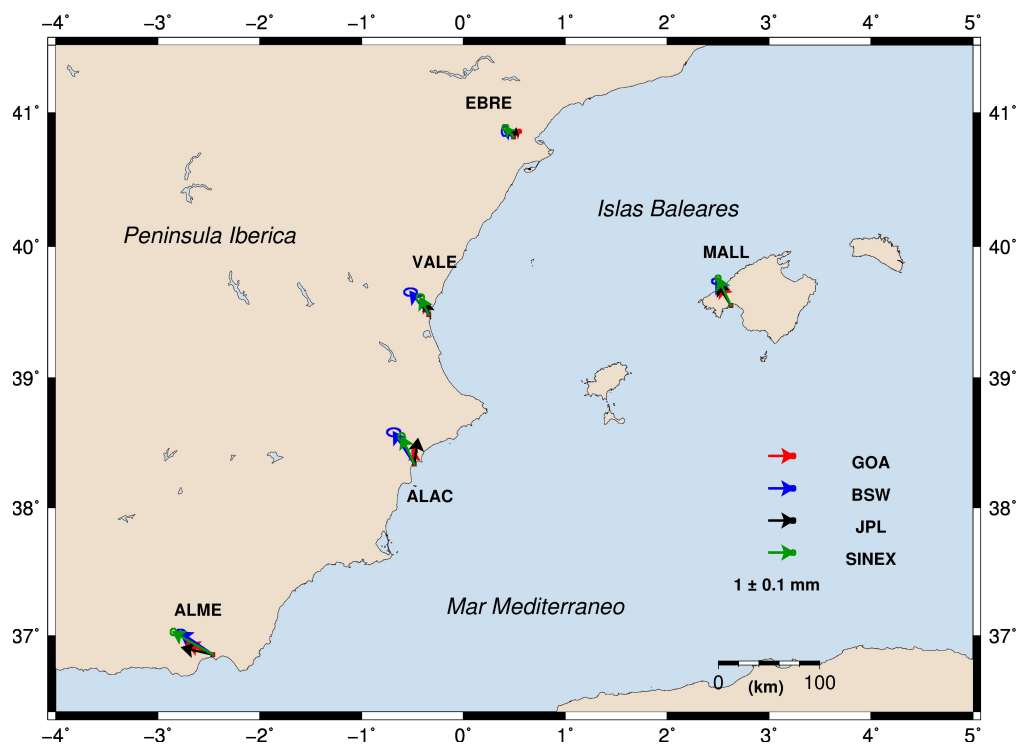


Figura 8.13: Vectores de velocidad residual respecto al modelo GEODVEL con condición NNR obtenidos con la aplicación PPP del BSW y con el software GOA

### 8.3. Estimación de velocidad con GIPSY-OASIS

Este apartado corresponde el núcleo principal de cálculo y en él se efectuó el procesamiento PPP con el software GIPSY-OASIS para las 34 estaciones distribuidas en las zonas de estudio. El intervalo de procesado se estableció entre las fechas 2010/090 a 2013/243, lo que engloba un total de 1249 sesiones y tres años y medio de datos.

La razón por la que se consideró este intervalo fue la necesidad de una homogeneidad en los datos de todos los vértices, contando con que todos ellos dispusieran de al menos dos años y medio de observaciones (Teferle et ál., 2007). Esto garantiza unos mínimos de calidad en la estimación de velocidad y unos errores coherentes.

A continuación se muestran las series temporales de todos los vértices procesados con el software GIPSY-OASIS (Figuras de la 8.14 a la 8.22), una relación de las velocidades estimadas con CATS más las velocidades correspondientes con el modelo GEODVEL (Tabla 8.10) y una representación vectorial de las velocidades absolutas y residuales considerando este modelo (Figuras 8.23 y 8.24).

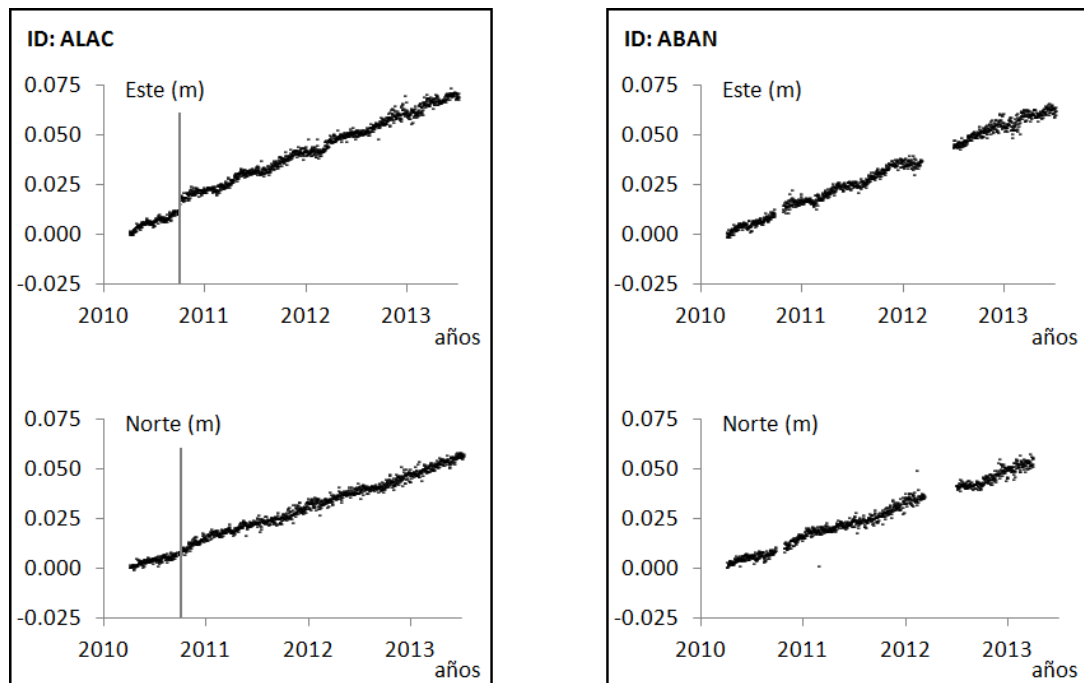


Figura 8.14: Series temporales de las estaciones ABAN y ALAC procesadas con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243. Se muestra el cambio de antena en la estación ALAC

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

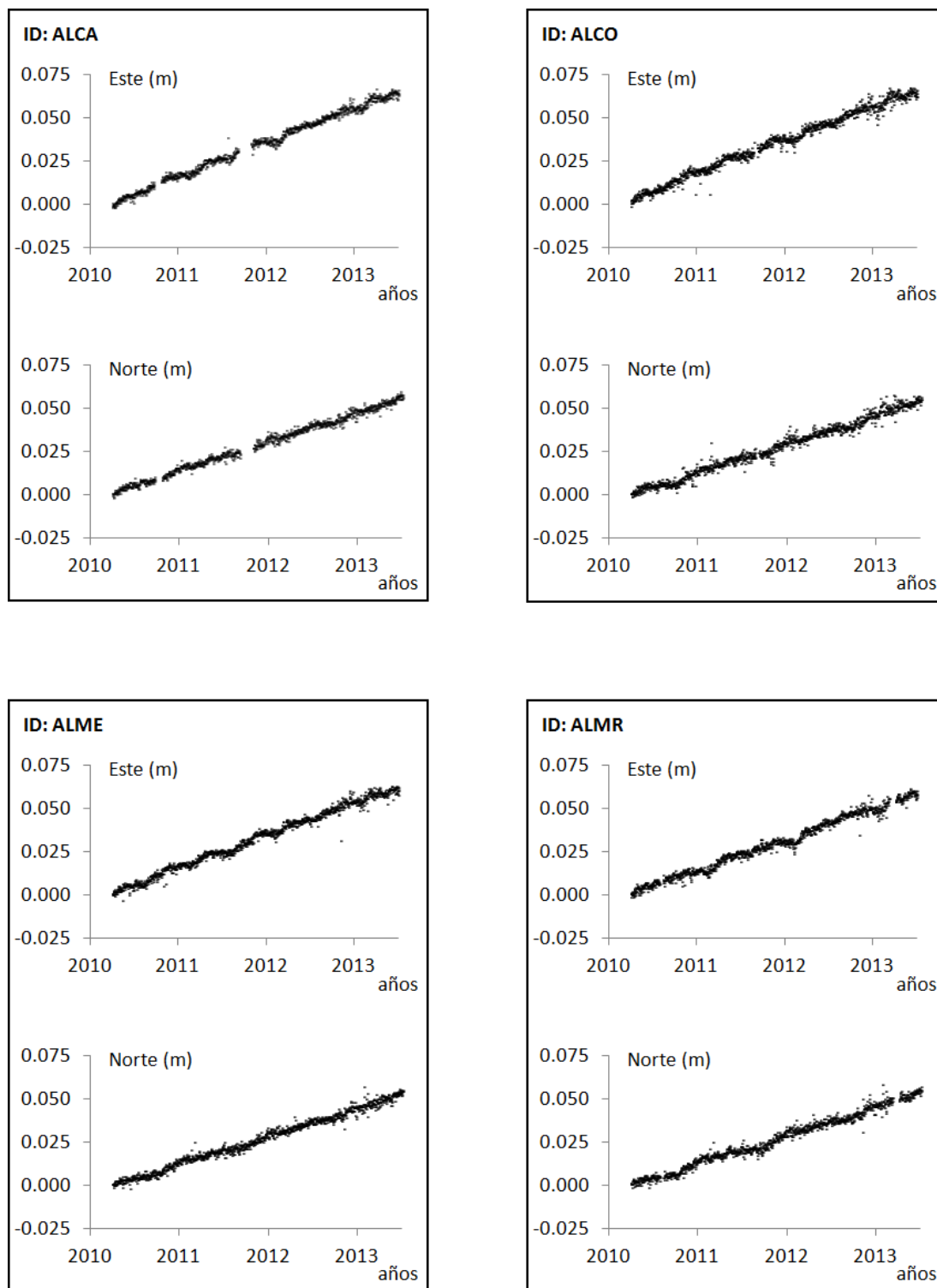


Figura 8.15: Series temporales de las estaciones ALCA, ALCO, ALME y ALMR procesadas con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243

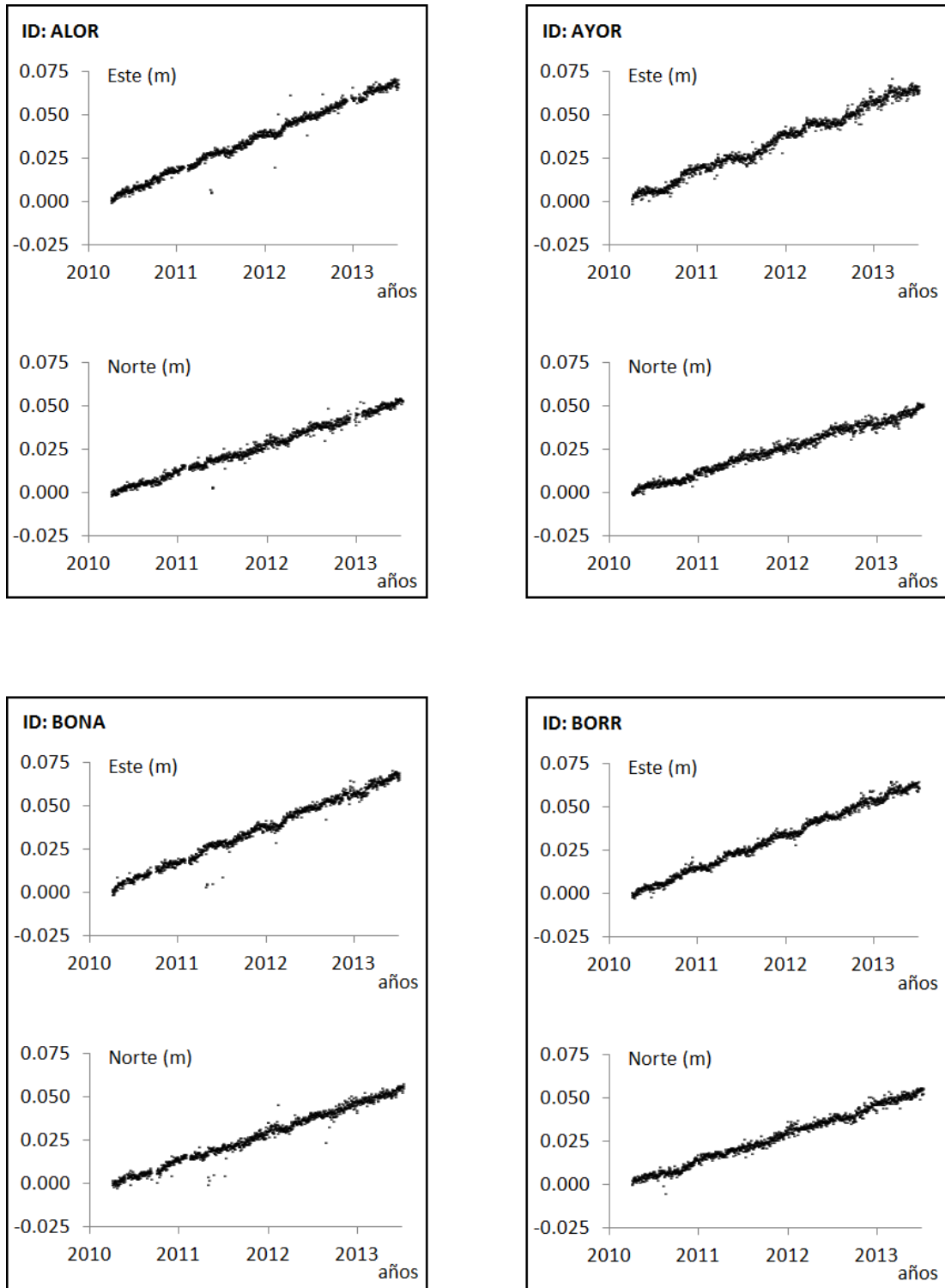


Figura 8.16: Series temporales de las estaciones ALOR, AYOR, BONA y BORR procesadas con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

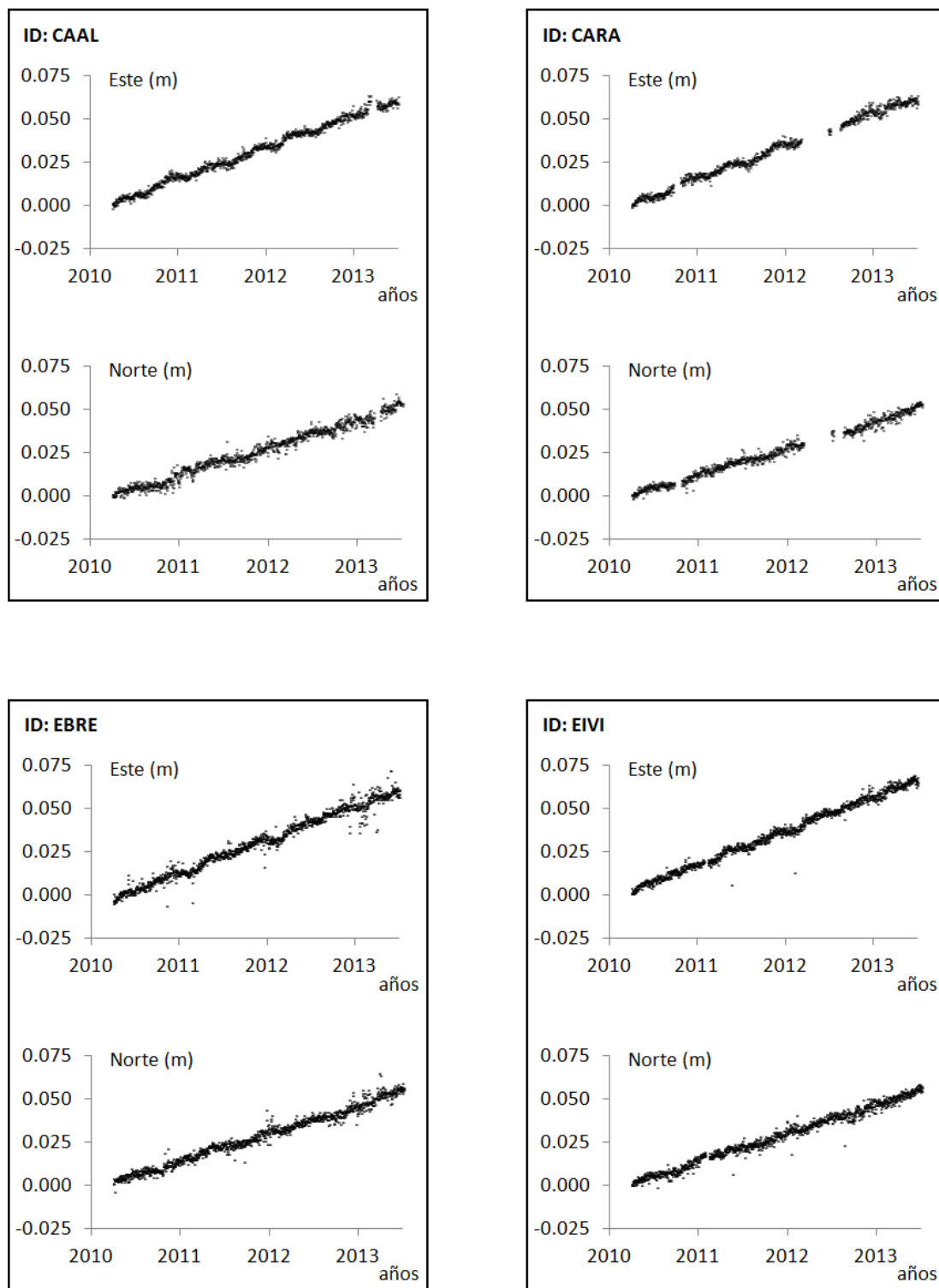


Figura 8.17: Series temporales de las estaciones CAAL, CARA, EBRE y EIVI procesadas con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243

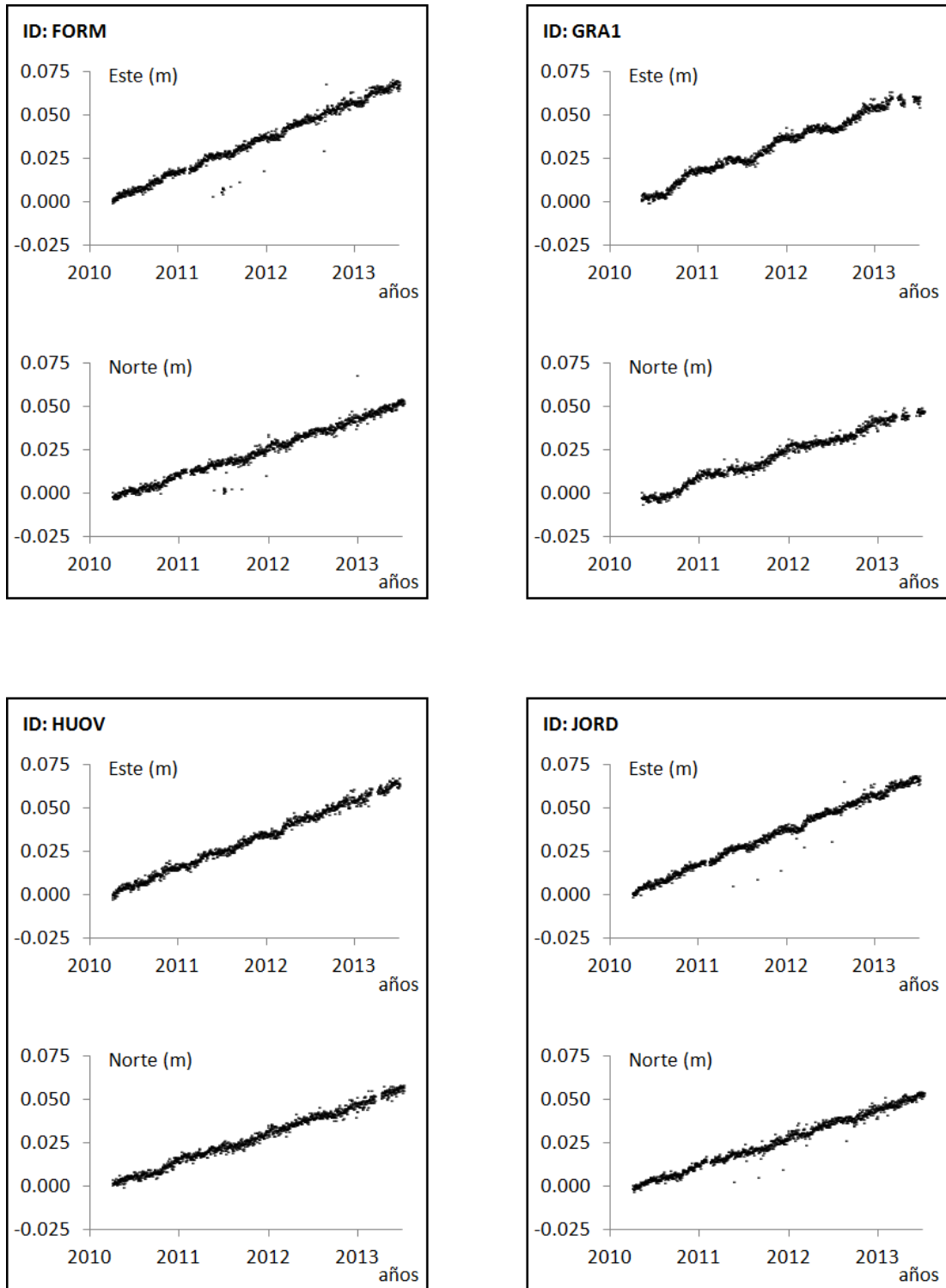


Figura 8.18: Series temporales de las estaciones FORM, GRA1, HUOV y JORD procesadas con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

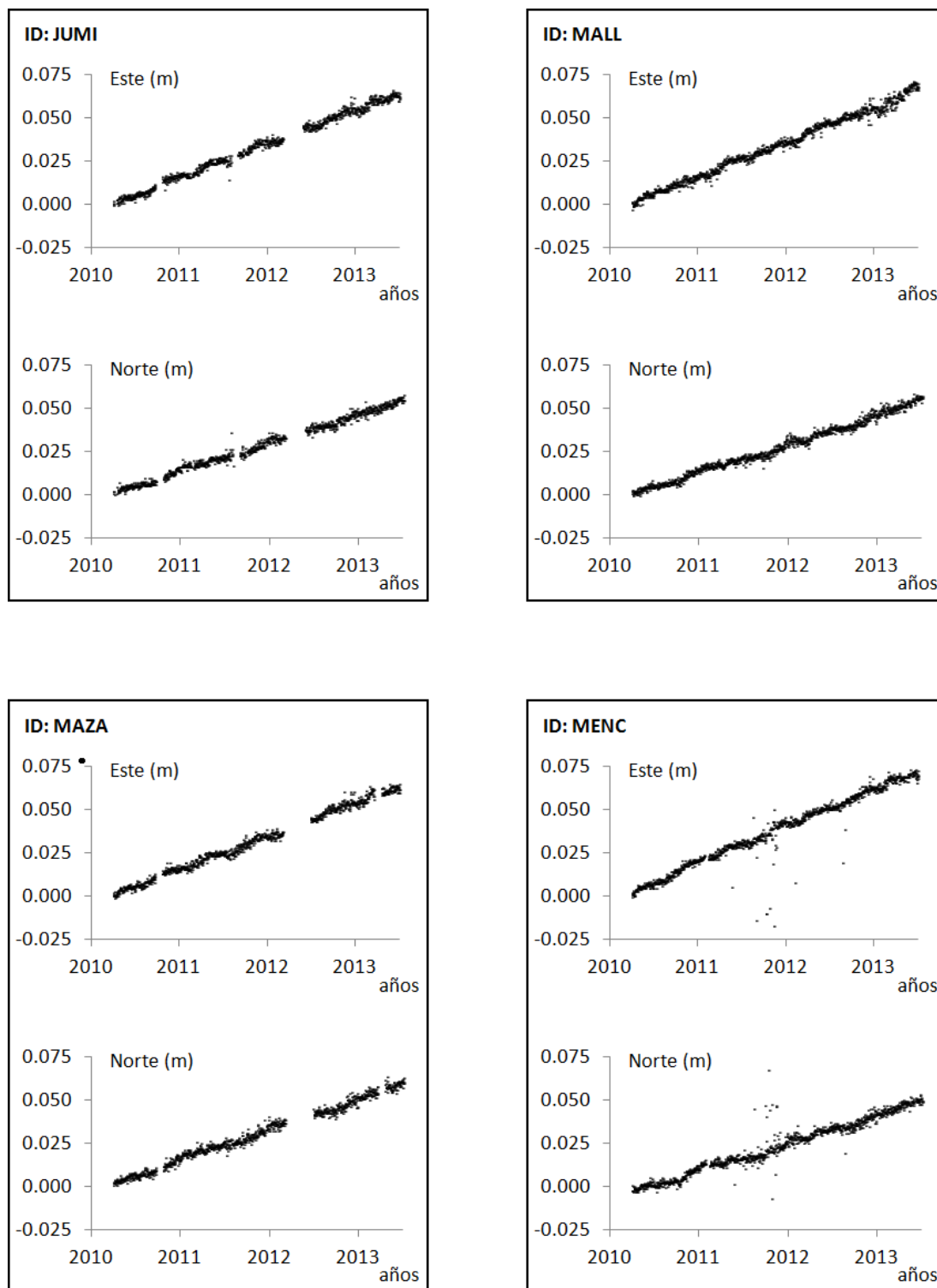


Figura 8.19: Series temporales de las estaciones JUMI, MALL, MAZA y MENC procesadas con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243

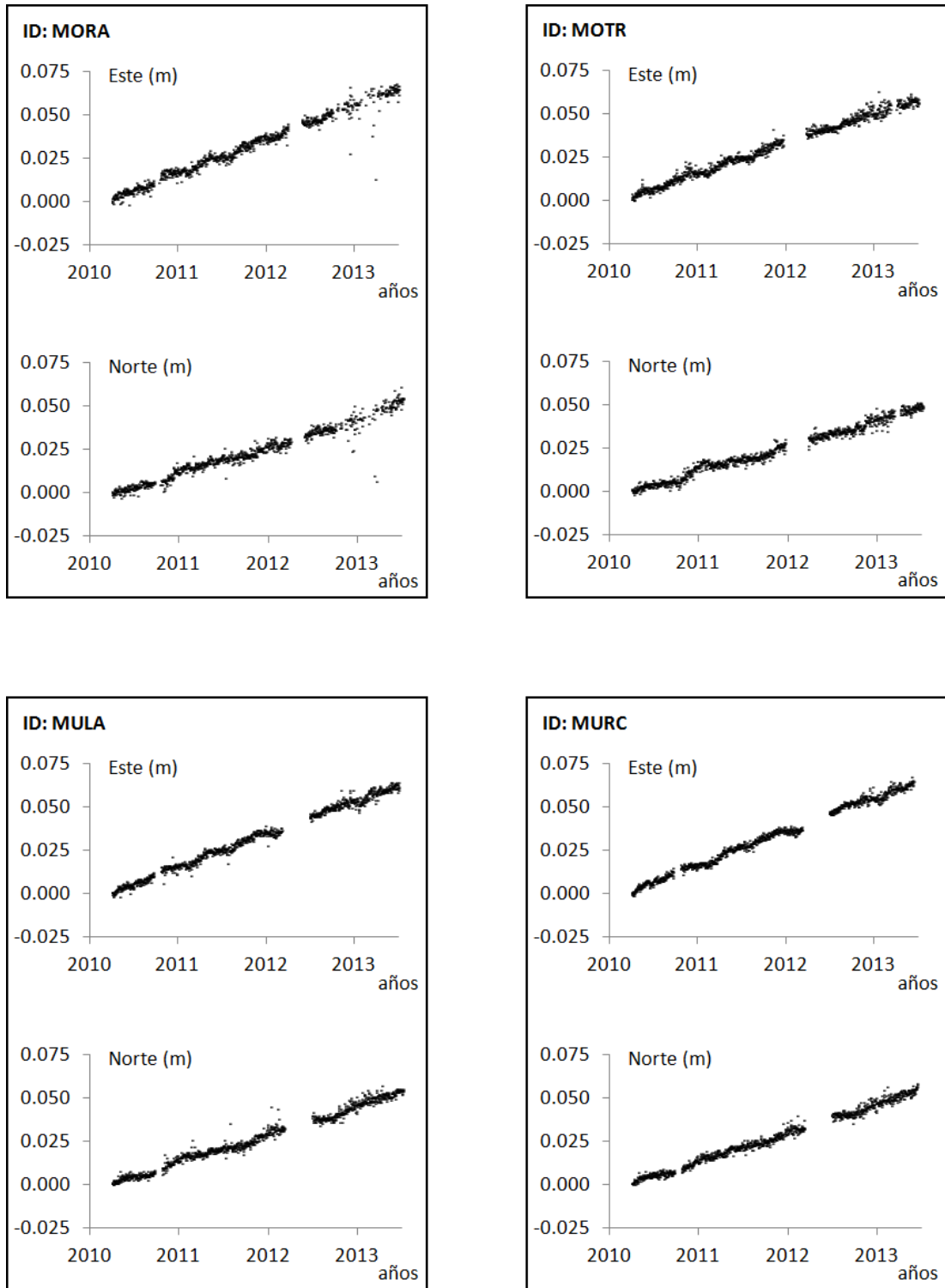


Figura 8.20: Series temporales de las estaciones MORA, MOTR, MULA y MURC procesadas con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

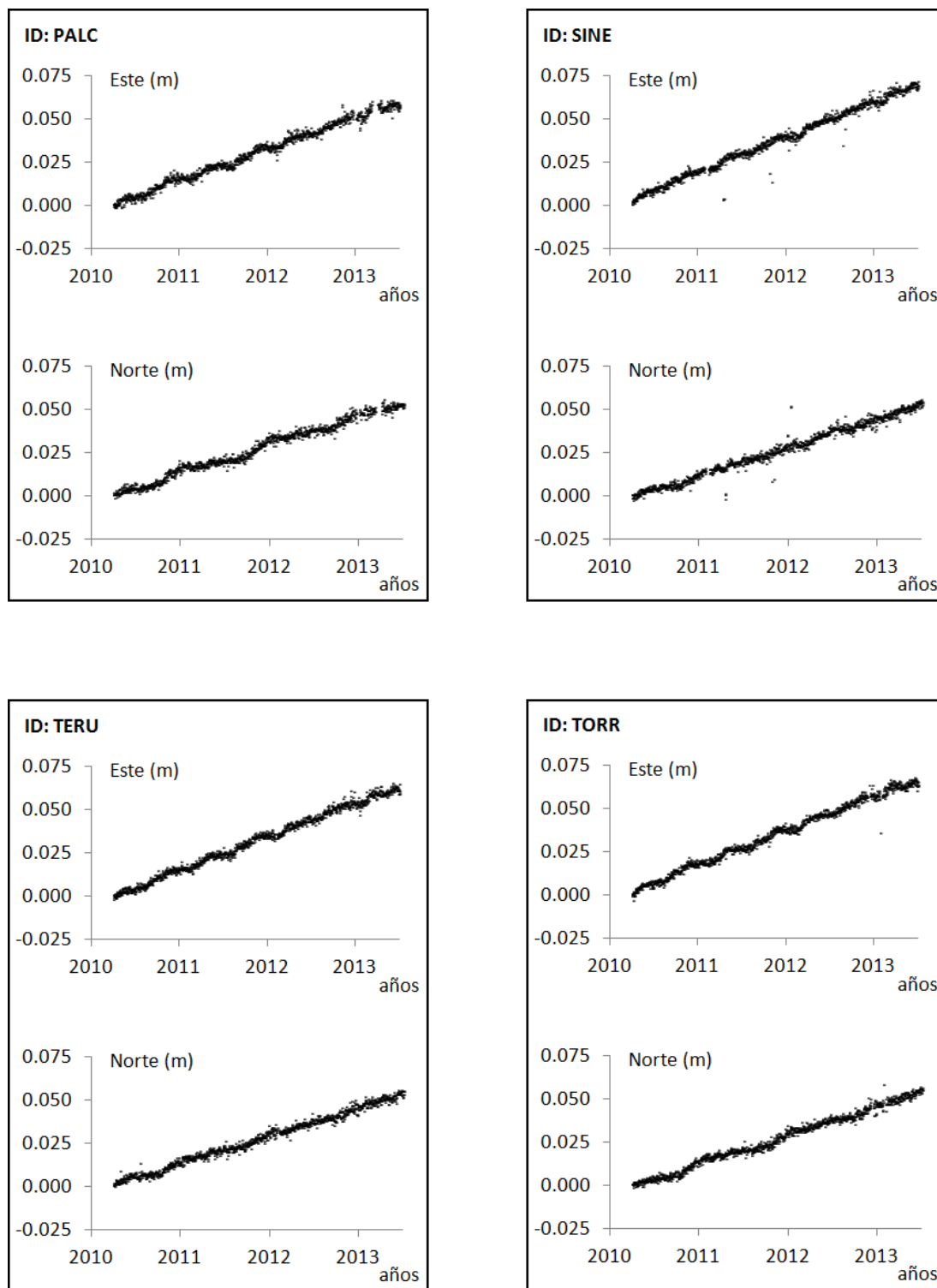


Figura 8.21: Series temporales de las estaciones PALC, SINE, TERU y TORR procesadas con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243

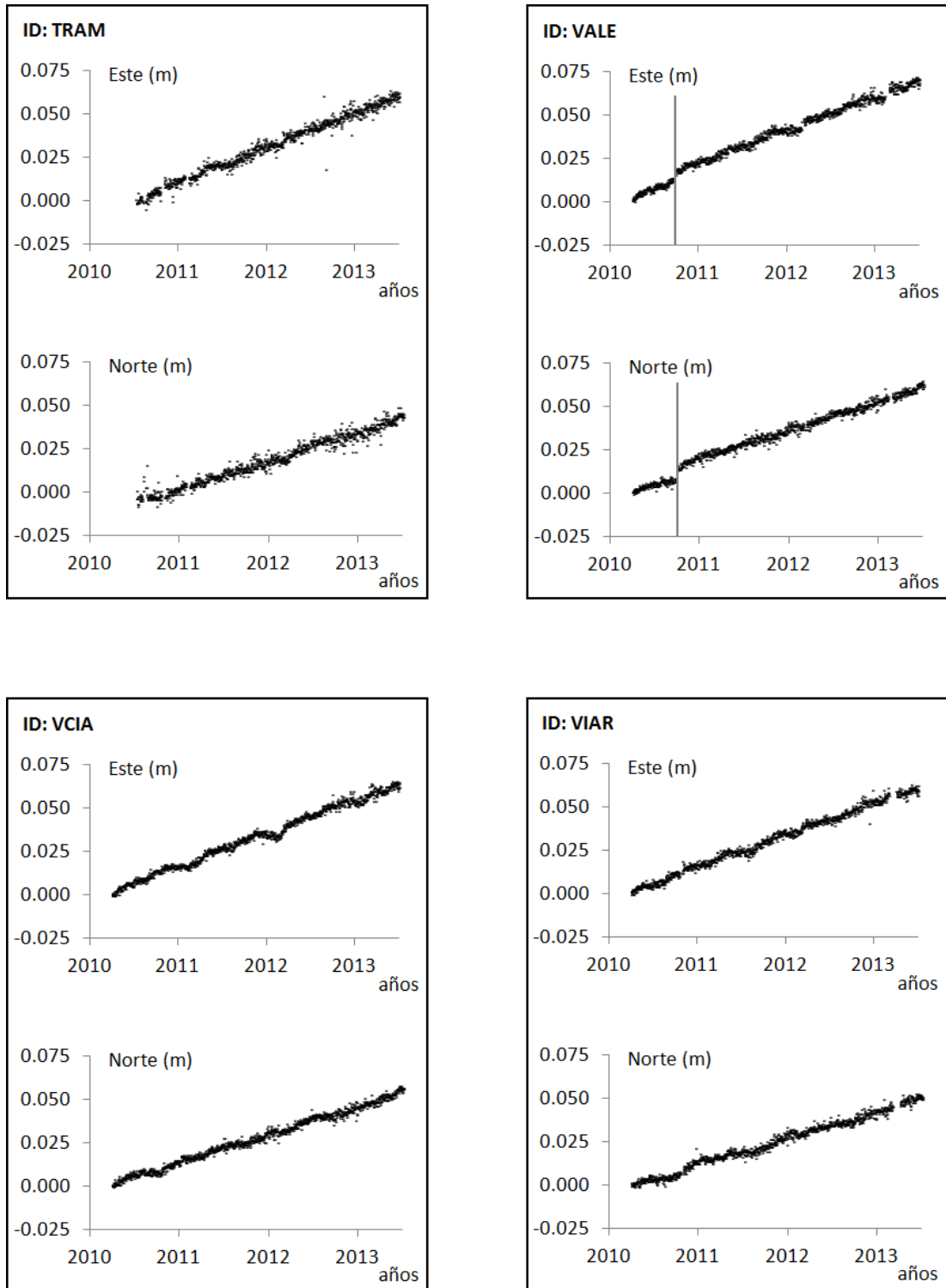


Figura 8.22: Series temporales de las estaciones TRAM, VALE, VCIA y VIAR procesadas con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243. Se muestra el cambio de antena en la estación VALE

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

Estación	ID	GOA (090/2010-243/2013)				GEODVEL	
		E	N	$\sigma E$	$\sigma N$	E	N
Abanilla	ABAN	19.50	17.17	0.05	0.05	19.97	15.66
Alicante	ALAC	19.64	16.28	0.06	0.05	20.04	15.63
Los Alcázares	ALCA	19.89	16.73	0.05	0.04	20.09	15.65
Alcoy	ALCO	19.30	16.52	0.06	0.06	19.97	15.63
Almería (IGN)	ALME	18.83	16.10	0.05	0.04	20.01	15.73
Almería (RAP)	ALMR	17.98	16.45	0.05	0.05	20.01	15.73
Alaior	ALOR	20.63	16.26	0.05	0.04	20.50	15.31
Ayora	AYOR	19.76	14.86	0.06	0.05	19.79	15.66
Cala Bonas	BONA	20.20	16.86	0.05	0.05	20.44	15.37
Borriana	BORR	19.84	16.06	0.05	0.04	19.78	15.60
Obs. Calar Alto	CAAL	18.41	15.99	0.05	0.06	19.92	15.74
Caravaca	CARA	18.85	15.60	0.05	0.05	19.85	15.71
Obs. del Ebro	EBRE	19.39	16.04	0.06	0.06	19.69	15.57
Ibiza	EIVI	19.85	16.46	0.05	0.05	20.23	15.51
Formentera	FORM	20.58	16.67	0.04	0.05	20.28	15.51
Granada	GRA1	18.70	16.26	0.05	0.05	19.75	15.79
Huerca Overa	HUOV	19.64	16.73	0.05	0.05	19.98	15.71
Sant Jordi	JORD	20.61	16.38	0.05	0.06	20.43	15.40
Jumilla	JUMI	19.60	16.30	0.05	0.04	19.86	15.67
Mallorca	MALL	20.37	16.57	0.05	0.05	20.32	15.42
Mazarrón	MAZA	19.32	17.60	0.05	0.05	20.05	15.67
Menorca	MENC	21.27	16.00	0.05	0.05	20.44	15.33
Moratalla	MORA	19.85	16.13	0.06	0.07	19.80	15.71
Motril	MOTR	17.20	14.81	0.05	0.05	19.85	15.78
Mula	MULA	19.04	16.20	0.05	0.05	19.93	15.68
Murcia	MURC	19.57	16.71	0.05	0.05	20.00	15.66
Pozo Alcón	PALC	18.17	16.21	0.05	0.05	19.76	15.76
Sineu	SINE	20.51	16.41	0.05	0.05	20.37	15.40
Teruel	TERU	19.51	15.92	0.05	0.04	19.51	15.66
Torre Vieja	TORR	19.93	16.74	0.05	0.04	20.08	15.64
Tramontana	TRAM	20.05	16.40	0.07	0.08	20.31	15.41
Valencia (IGN)	VALE	18.99	16.42	0.07	0.06	19.82	15.62
Valencia (ERVA)	VCIA	19.19	16.18	0.05	0.04	19.83	15.62
Vva. del Arzobispo	VIAR	18.39	15.49	0.05	0.05	19.65	15.76

Tabla 8.10: Velocidades absolutas de los 34 estaciones de las zonas de estudio procesadas con GIPSY-OASIS en el intervalo 2010/090 - 2013/243 junto a las velocidades del modelo GEODVEL con condición NNR. Las unidades en mm/año

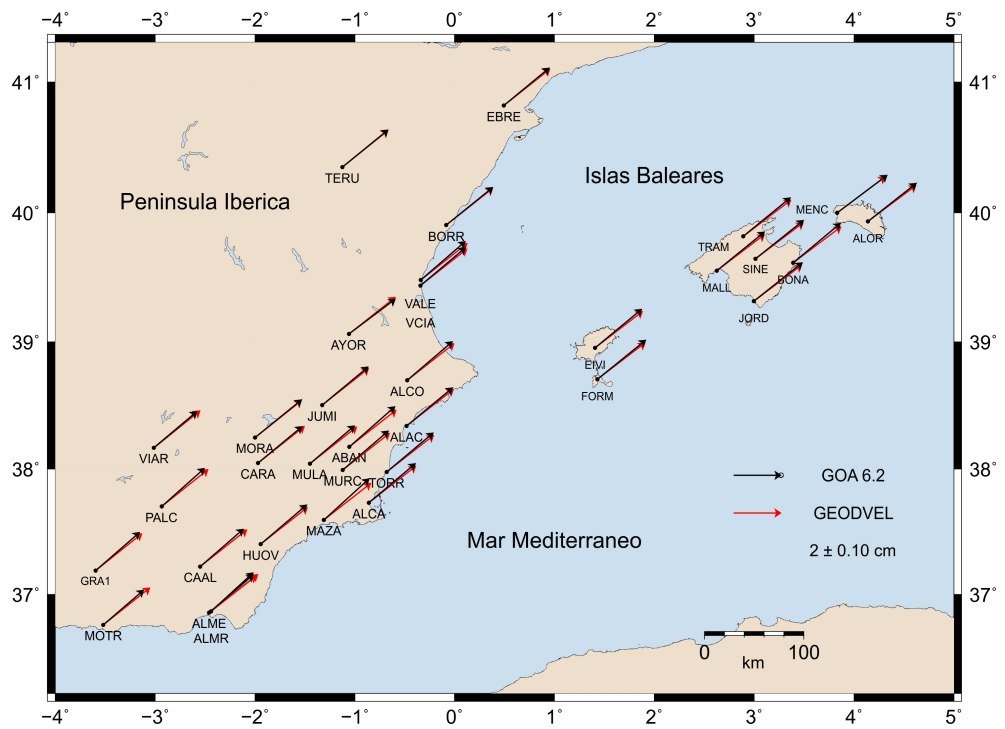


Figura 8.23: Campo de velocidades absolutas de las 34 estaciones de las zonas de estudio, procesados con GOA, en el intervalo 2010/090-2013/243

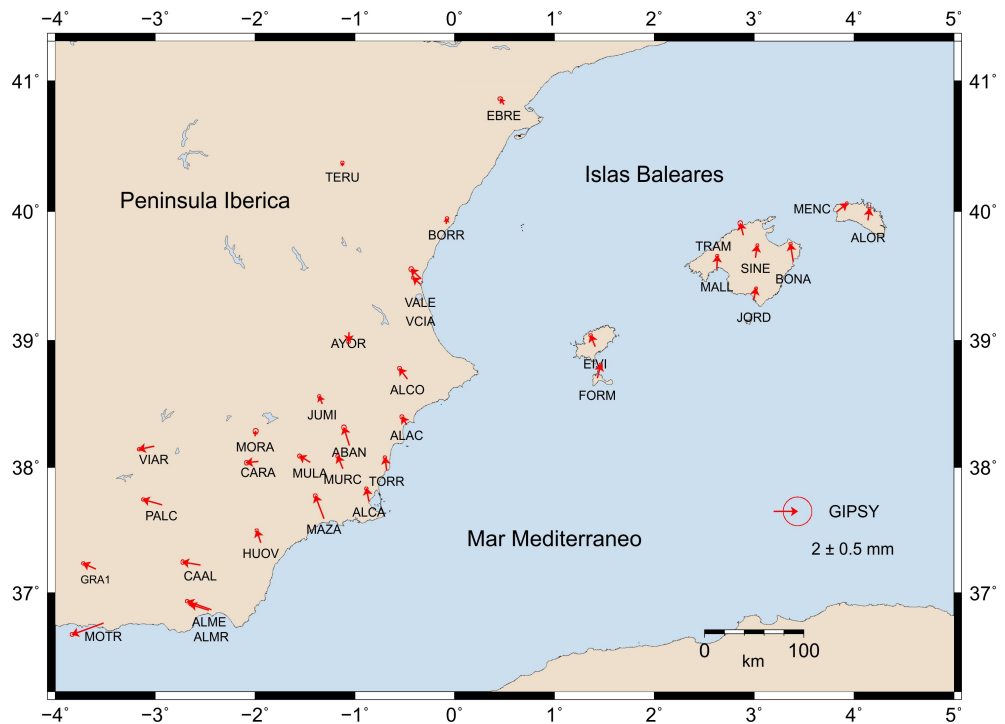


Figura 8.24: Campo de velocidades residuales respecto al modelo GEODVEL-NNR de las 34 estaciones de las zonas de estudio, procesados con GOA, en el intervalo 2010/090-2013/243

## 8.4. Comparación de resultados

Una vez obtenidas las velocidades principales con GIPSY-OASIS en un intervalo de tiempo de 2010/090 a 2013/243 se procedió a un contraste de los resultados obtenidos mediante un proceso comparativo. Por un lado se utilizó un intervalo menor de procesado con GOA para comprobar la influencia de la reducción de las observaciones en el cómputo de la velocidad final en las estaciones y, por otro, se calcularon las coordenadas con la aplicación PPP del software BSW en un intervalo similar para comprobar la dependencia del software GPS en la estimación.

En el primer caso el objetivo es determinar la variabilidad de los resultados en función de la longitud de la serie temporal, comprobando que un segmento de más de dos años y medio es susceptible de calcular también un dato de velocidad fiable al tomado como bueno de tres años (Teferle et ál., 2007). La reducción respecto al procesado general de 1249 sesiones es de 178 (6 meses), lo que implica un intervalo desde 2010/090 a 2013/065 y una reducción del 14% de los datos originales respecto al total.

En el caso del software BSW, la dispersión mayor de la serie temporal de posiciones, la heterogeneidad de marcos de referencia en los que se obtienen los resultados, el enfoque principal dirigido al procesamiento relativo y con una aplicación PPP planteada para propósitos de testeo (Hugentobler et ál., 2006), desplazaba este software respecto a GOA a la hora de determinar coordenadas PPP. El propósito de esta comparación es determinar que, aún existiendo estos aspectos limitantes, una serie temporal de coordenadas lo suficientemente amplia obtenida con el software BSW es capaz de calcular un dato de velocidad con ciertas garantías, tal como viene descrito en Teferle et ál. (2007) y Khan y Knudsen (2011). Para ello se planteó la comparación en el mismo intervalo que para el procesado general con GOA desde 2010/090 a 2013/243. Ya que BSW procesa en cada marco de referencia, se consideró además el cambio de marco que afecta a este intervalo de IGS08 a IGb08 como offset de la serie temporal.

A continuación se muestran los resultados de estas comparativas con los valores de velocidad GOA en ambos intervalos y respecto al software BSW para los 34 vértices en las tablas 8.11 y 8.12 respectivamente. Asimismo se incluyen representaciones gráficas de las velocidades absolutas y residuales considerando el modelo GEODVEL con condición NNR (Figuras de la 8.25 a la 8.28).

Estación	GIPSY-OASIS 6.2 (090/2010 - 065/2013)				GIPSY-OASIS 6.2 090/2010 - 243/2013			
	E	N	$\sigma E$	$\sigma N$	E	N	$\sigma E$	$\sigma N$
ABAN	19.74	17.09	0.07	0.07	19.50	17.17	0.05	0.05
ALAC	19.62	16.08	0.07	0.07	19.64	16.28	0.06	0.05
ALCA	20.15	16.78	0.06	0.06	19.89	16.73	0.05	0.04
ALCO	19.58	16.51	0.07	0.07	19.30	16.52	0.06	0.06
ALME	19.15	16.03	0.06	0.06	18.83	16.10	0.05	0.04
ALMR	18.05	16.35	0.07	0.06	17.98	16.45	0.05	0.05
ALOR	20.83	16.33	0.05	0.05	20.63	16.26	0.05	0.04
AYOR	19.80	15.04	0.07	0.06	19.76	14.86	0.06	0.05
BONA	20.32	16.93	0.06	0.05	20.20	16.86	0.05	0.05
BORR	20.03	16.08	0.06	0.06	19.84	16.06	0.05	0.04
CAAL	18.67	15.92	0.06	0.08	18.41	15.99	0.05	0.06
CARA	19.14	15.49	0.07	0.08	18.85	15.60	0.05	0.05
EBRE	19.72	15.76	0.08	0.07	19.39	16.04	0.06	0.06
EIVI	19.95	16.45	0.06	0.06	19.85	16.46	0.05	0.05
FORM	20.65	16.54	0.05	0.05	20.58	16.67	0.04	0.05
GRA1	19.00	16.33	0.06	0.06	18.70	16.26	0.05	0.05
HUOV	19.63	16.63	0.06	0.06	19.64	16.73	0.05	0.05
JORD	20.58	16.43	0.05	0.05	20.61	16.38	0.05	0.06
JUMI	19.85	16.33	0.06	0.06	19.60	16.30	0.05	0.04
MALL	20.06	16.33	0.06	0.05	20.37	16.57	0.05	0.05
MAZA	19.53	17.56	0.07	0.07	19.32	17.60	0.05	0.05
MENC	21.56	15.96	0.05	0.06	21.27	16.00	0.05	0.05
MORA	19.86	15.46	0.09	0.09	19.85	16.13	0.06	0.07
MOTR	17.48	14.58	0.07	0.07	17.20	14.81	0.05	0.05
MULA	19.25	16.09	0.07	0.07	19.04	16.20	0.05	0.05
MURC	19.80	16.68	0.06	0.07	19.57	16.71	0.05	0.05
PALC	18.47	16.50	0.06	0.06	18.17	16.21	0.05	0.05
SINE	20.60	16.49	0.05	0.06	20.51	16.41	0.05	0.05
TERU	19.78	15.93	0.06	0.06	19.51	15.92	0.05	0.04
TORR	20.24	16.72	0.06	0.06	19.93	16.74	0.05	0.04
TRAM	20.12	16.42	0.08	0.09	20.05	16.40	0.07	0.08
VALE	18.90	16.28	0.08	0.09	18.99	16.42	0.07	0.06
VCIA	19.38	16.11	0.05	0.05	19.19	16.18	0.05	0.04
VIAR	18.57	15.34	0.06	0.06	18.39	15.49	0.05	0.05

Tabla 8.11: Velocidades absolutas de las 34 estaciones estimadas a partir de las series temporales calculadas con el software GIPSY-OASIS 6.2. Períodos procesados 2010/090-2013/065 y 2010/090-2013/243 en mm/año

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

Estación	PPP Bernese 5.0 (090/2010 - 243/2013)				GIPSY-OASIS 6.2 090/2010 - 243/2013			
	E	N	$\sigma E$	$\sigma N$	E	N	$\sigma E$	$\sigma N$
ABAN	19.82	18.10	0.30	0.21	19.50	17.17	0.05	0.05
ALAC	18.65	17.14	0.30	0.21	19.64	16.28	0.06	0.05
ALCA	19.94	17.70	0.27	0.18	19.89	16.73	0.05	0.04
ALCO	19.49	16.77	0.28	0.19	19.30	16.52	0.06	0.06
ALME	18.89	17.13	0.27	0.18	18.83	16.10	0.05	0.04
ALMR	18.57	17.07	0.27	0.19	17.98	16.45	0.05	0.05
ALOR	20.19	16.67	0.24	0.19	20.63	16.26	0.05	0.04
AYOR	20.00	15.30	0.27	0.18	19.76	14.86	0.06	0.05
BONA	20.31	17.34	0.25	0.19	20.20	16.86	0.05	0.05
BORR	19.73	16.54	0.25	0.18	19.84	16.06	0.05	0.04
CAAL	18.63	16.21	0.27	0.21	18.41	15.99	0.05	0.06
CARA	19.14	17.13	0.31	0.22	18.85	15.60	0.05	0.05
EBRE	19.07	16.28	0.29	0.23	19.39	16.04	0.06	0.06
EIVI	19.84	16.58	0.26	0.19	19.85	16.46	0.05	0.05
FORM	20.34	16.89	0.26	0.18	20.58	16.67	0.04	0.05
GRA1	19.58	17.07	0.29	0.19	18.70	16.26	0.05	0.05
HUOV	19.91	17.58	0.27	0.19	19.64	16.73	0.05	0.05
JORD	20.19	16.80	0.25	0.18	20.61	16.38	0.05	0.06
JUMI	20.02	16.84	0.29	0.20	19.60	16.30	0.05	0.04
MALL	19.84	16.73	0.26	0.18	20.37	16.57	0.05	0.05
MAZA	19.86	18.66	0.29	0.22	19.32	17.60	0.05	0.05
MENC	20.38	16.93	0.30	0.21	21.27	16.00	0.05	0.05
MORA	19.50	15.98	0.32	0.25	19.85	16.13	0.06	0.07
MOTR	16.98	15.75	0.28	0.19	17.20	14.81	0.05	0.05
MULA	19.40	17.38	0.28	0.20	19.04	16.20	0.05	0.05
MURC	19.34	17.41	0.29	0.20	19.57	16.71	0.05	0.05
PALC	18.16	17.02	0.28	0.18	18.17	16.21	0.05	0.05
SINE	20.15	16.56	0.26	0.18	20.51	16.41	0.05	0.05
TERU	19.61	16.37	0.25	0.18	19.51	15.92	0.05	0.04
TORR	19.88	17.48	0.26	0.18	19.93	16.74	0.05	0.04
TRAM	20.00	16.89	0.32	0.23	20.05	16.40	0.07	0.08
VALE	18.56	17.00	0.30	0.23	18.99	16.42	0.07	0.06
VCIA	18.82	16.75	0.25	0.18	19.19	16.18	0.05	0.04
VIAR	18.05	16.54	0.26	0.19	18.39	15.49	0.05	0.05

Tabla 8.12: Velocidades absolutas de los 34 estaciones estimadas a partir de las series temporales calculadas con GIPSY-OASIS 6.2 y la aplicación PPP de Bernese 5.0. Período procesado 2009/001-365/2011 en mm/año

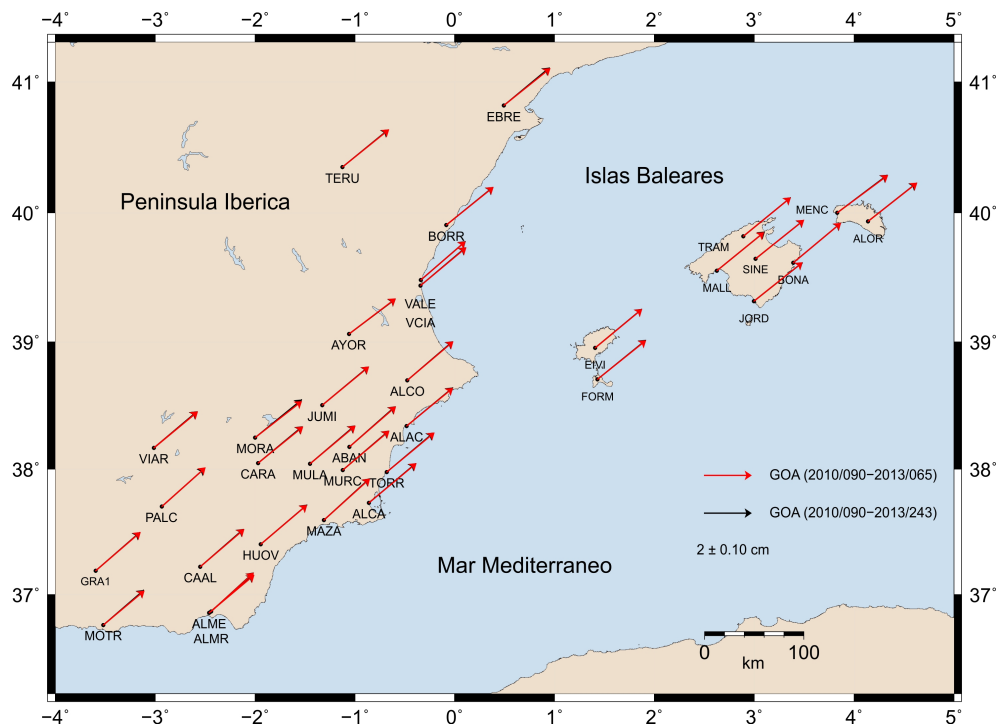


Figura 8.25: Campo de velocidades absolutas de las 34 estaciones estimadas a partir de las series temporales calculadas con GIPSY-OASIS 6.2. Períodos procesados 2010/090-2013/065 y 2010/090-2013/243

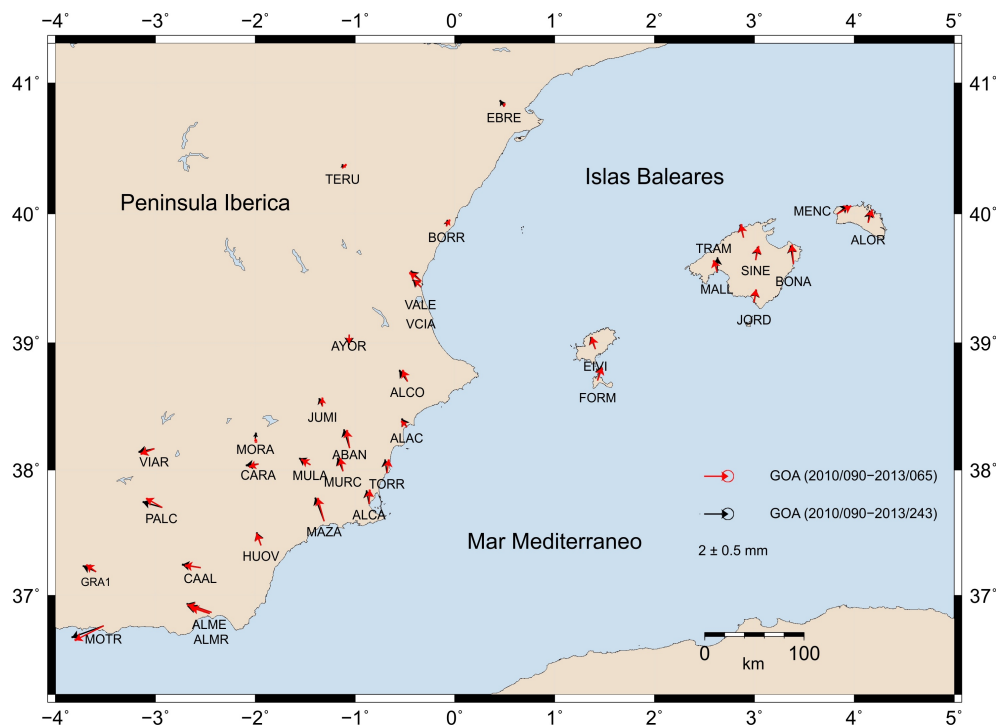


Figura 8.26: Campo de velocidades residuales respecto al modelo GEODVEL-NNR de las 34 estaciones de las zonas de estudio. Estimación a partir de las series temporales calculadas con GIPSY-OASIS 6.2. Períodos procesados 2010/090-2013/065 y 2010/090-2013/243

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

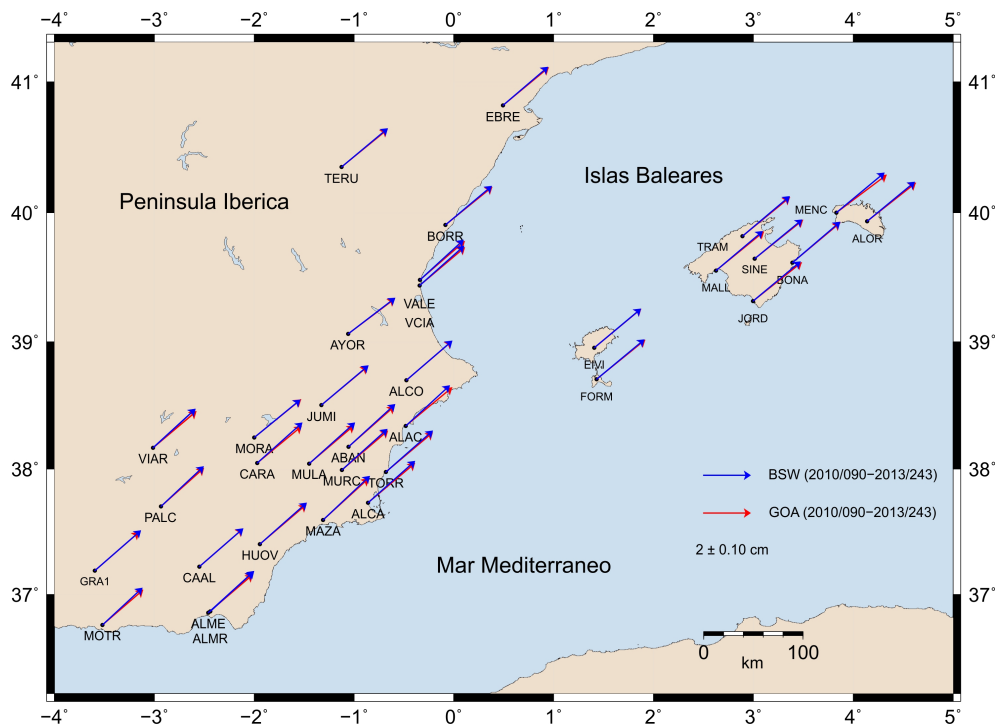


Figura 8.27: Campo de velocidades absolutas de las 34 estaciones estimadas a partir de las series temporales calculadas con GIPSY-OASIS 6.2 y la aplicación PPP de Bernese 5.0. Período procesado 2010/090-2013/243

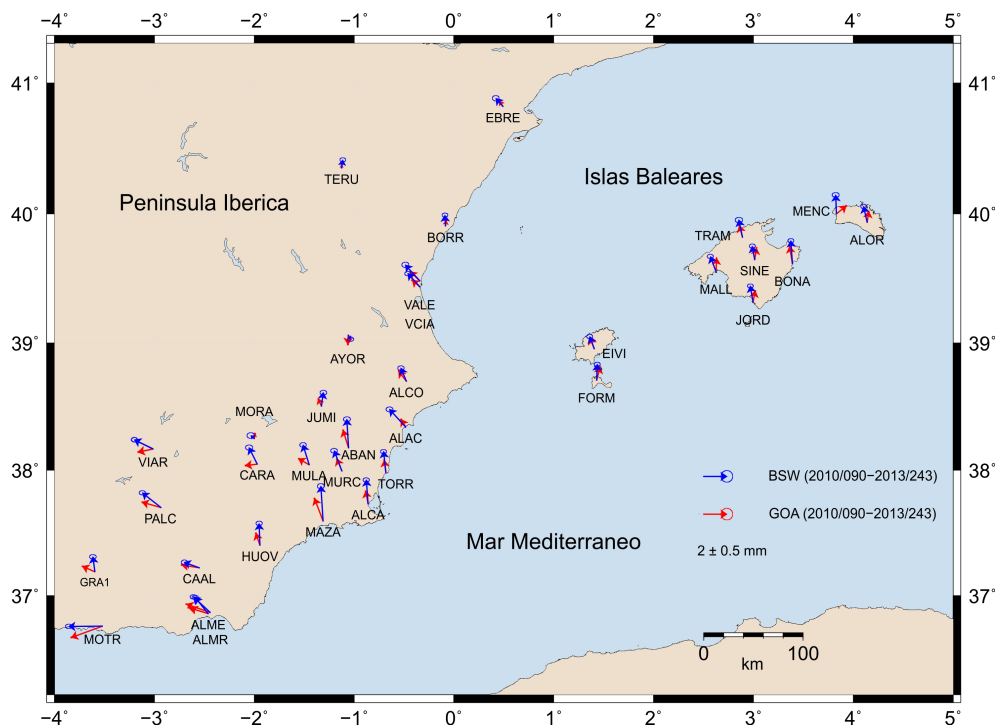


Figura 8.28: Campo de velocidades residuales respecto al modelo GEODVEL-NNR de las 34 estaciones de las zonas de estudio. Estimación a partir de las series temporales calculadas con GIPSY-OASIS 6.2 y la aplicación PPP de Bernese 5.0. Período procesado 2010/090-2013/243

## 8.5. Estimación de la deformación en las zonas de estudio

Para el estudio de los esfuerzos en el sector oriental de la Cordillera Bética y el Archipiélago Balear se plantearon una serie de criterios específicos adaptados a ambas zonas. En primer lugar se editó el paso de malla original generado por defecto en el software GRID-STRAIN (Teza et ál., 2008) de 13120 metros a 15000 para tener de este modo un valor entero más manejable a la hora del cálculo. Asimismo se varió el factor de escala de 45000 a 75000 para tener un equilibrio adecuado entre la representación de los strains y el nivel de significación.

	Extensión		Compresión		Ángulo
ABAN	7.794	± 4.256	-0.942	± 2.039	75.587°
ALAC	7.966	± 0.822	-5.917	± 2.918	-58.740°
ALCA	11.313	± 5.454	-6.537	± 16.363	-79.702°
ALCO	2.409	± 0.696	-3.327	± 2.488	-55.365°
ALME	13.032	± 10.564	-4.849	± 2.246	61.816°
ALMR	13.032	± 10.056	-4.849	± 2.246	61.816°
CAAL	13.759	± 3.783	-2.362	± 1.087	69.856°
CARA	10.152	± 5.492	-10.327	± 1.702	60.423°
GRA1	17.202	± 14.064	-8.754	± 42.193	11.927°
HUOV	14.221	± 4.323	-7.676	± 2.135	74.923°
JUMI	5.657	± 3.303	-8.401	± 0.693	60.853°
MAZA	6.397	± 11.030	-17.679	± 33.090	80.525°
MORA	12.100	± 5.950	-10.486	± 0.941	44.137°
MOTR	34.749	± 4.199	-4.317	± 0.972	28.944°
MULA	9.231	± 3.938	-9.435	± 1.611	67.572°
MURC	8.907	± 10.021	-1.340	± 30.062	82.502°
PALC	6.071	± 8.271	-5.694	± 24.812	83.590°
TORR	9.305	± 1.206	-5.241	± 2.697	-72.133°
VALE	8.335	± 2.834	-2.993	± 11.376	-52.485°
VCIA	8.335	± 2.834	-2.993	± 11.376	-52.485°
VIAR	9.442	± 5.335	-11.516	± 16.004	79.475°

Tabla 8.13: Magnitudes de los de strain rates calculados en el sector oriental de la Cordillera Bética en ntrains/año. Ángulo correspondiente al strain de extensión desde la dirección Norte, en grados

La limitación geográfica para ambas zonas se hizo necesaria debido a la heterogeneidad y distribución de las estaciones. Por un lado en el Archipiélago Balear prima la presencia de estaciones en cada una de las islas, mientras que en el sector

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

---

oriental de la Cordillera Bética la distribución está condicionada a las distintas redes regionales permanentes. Esto provoca que el estudio de esfuerzos deba adecuarse a las distintas zonas y estaciones disponibles. En concreto, para el sector más oriental de la Cordillera Bética el estudio se limitó a un área comprendida al Sur de las estaciones VALE y VCIA hasta la estación de MOTR. Esto es debido a que más al norte las velocidades residuales de las estaciones respecto al modelo GEODVEL son prácticamente nulas (Figura 8.24), lo que concuerda con la ausencia de deformación.

	Extensión		Compresión		Ángulo
ALOR	2.338	± 5.288	-37.048	± 0.895	48.541°
BONA	1.592	± 8.879	-13.814	± 3.373	63.051°
EIVI	22.622	± 2.240	-10.214	± 6.720	-71.585°
FORM	22.126	± 2.308	-10.396	± 6.923	-71.006°
JORD	4.245	± 1.156	-0.035	± 5.427	-35.670°
MALL	5.644	± 0.834	-1.920	± 5.078	-55.192°
MENC	2.793	± 6.244	-36.004	± 1.162	49.855°
SINE	1.610	± 10.582	-2.988	± 31.747	-87.172°
TRAM	6.977	± 2.147	-5.815	± 6.111	-75.577°

Tabla 8.14: Magnitudes de los de strain rates calculados en el Archipiélago Balear en nstrains/año. Ángulo correspondiente al strain de extensión desde la dirección Norte, en grados

Tras las pruebas de cálculo con los distintos mallados y factores de escala, la zona norte del sector oriental de la Cordillera Bética cercano al vértice AYOR generaba una elevada tasa de error en las inmediaciones debido a un dato de velocidad discordante respecto a las estaciones cercanas de JUMI, ALCO, VALE y VCIA. Debido a esto se decidió eliminar esta estación del cómputo de esfuerzos en la zona sureste a fin de obtener un modelo más realista.

En las tablas 8.13 y 8.14 vienen descritas las estaciones que participan en el cálculo de esfuerzos, los valores y errores asociados en cada punto en nstrain/año y el ángulo en grados respecto a la dirección Norte del tensor de extensión. Los valores positivos están relacionados con extensión mientras que los negativos con los de compresión. En las figuras 9.1 y 9.2 se incluyen los campos de velocidad residual respecto al modelo GEODVEL bajo condición NNR en ambas zonas de estudio, señalando las fallas y accidentes más sobresalientes de ambas regiones, y la elipse de error estándar asociada a la estimación de la velocidad.

Para una mayor claridad en la interpretación de los resultados se optó por elegir las representaciones gráficas correspondientes a los strains calculados en los puntos del mallado y el mapa de contorno de esfuerzos del GRID-STRAIN. Las figuras 8.29 y 8.30 muestran los resultados en el sector oriental de la Cordillera Bética, y las figuras 8.31 y 8.32 los correspondientes al Archipiélago Balear.

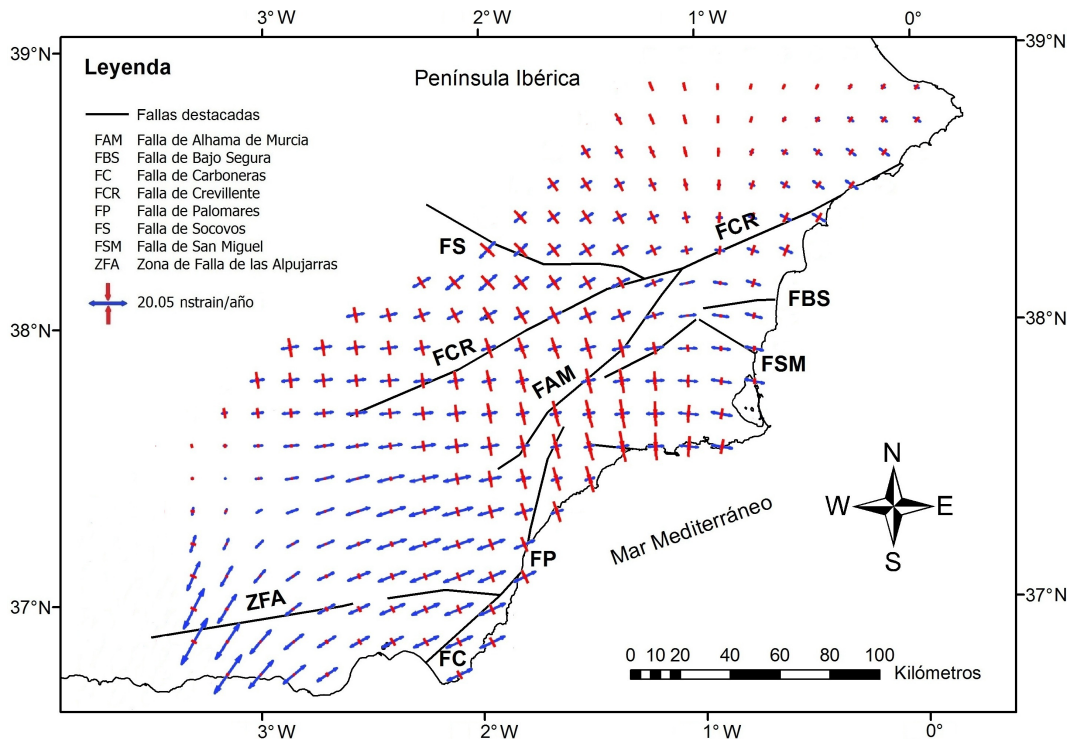


Figura 8.29: Strain rates calculados en el Sector Oriental de la Cordillera Bética. Las flechas rojas indican compresión y las azules extensión. Unidades nstrain/año

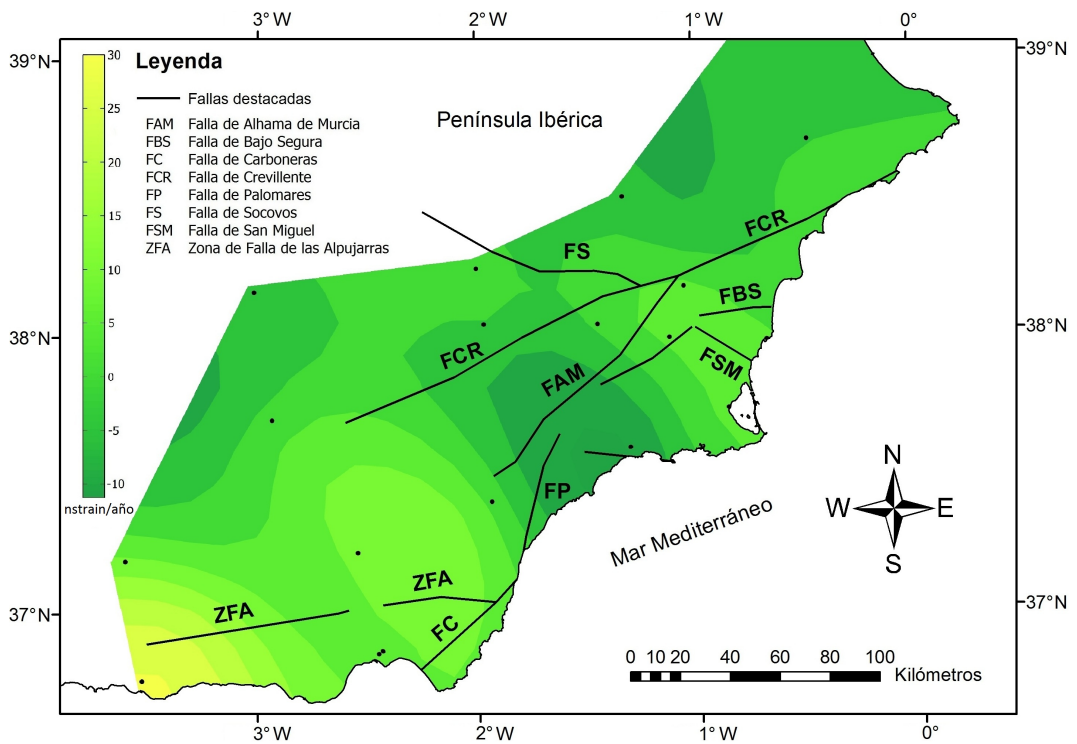


Figura 8.30: Mapa de deformación en el Sector Oriental de la Cordillera Bética. Los colores verdes indican predominancia de compresión y los amarillos de extensión. Unidades nstrain/año

8.- Estimación de la velocidad y deformación de las zonas de estudio

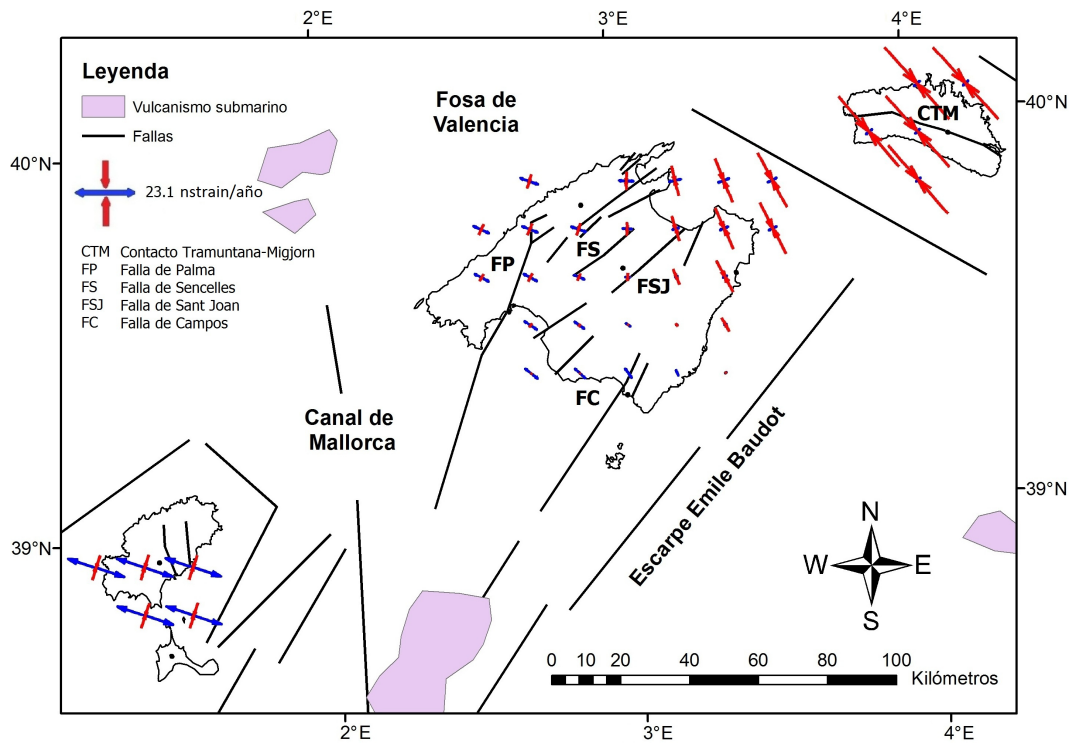


Figura 8.31: Strain rates calculados en el Archipiélago Balear. Las flechas rojas indican compresión y las azules extensión. Unidades nstrain/año

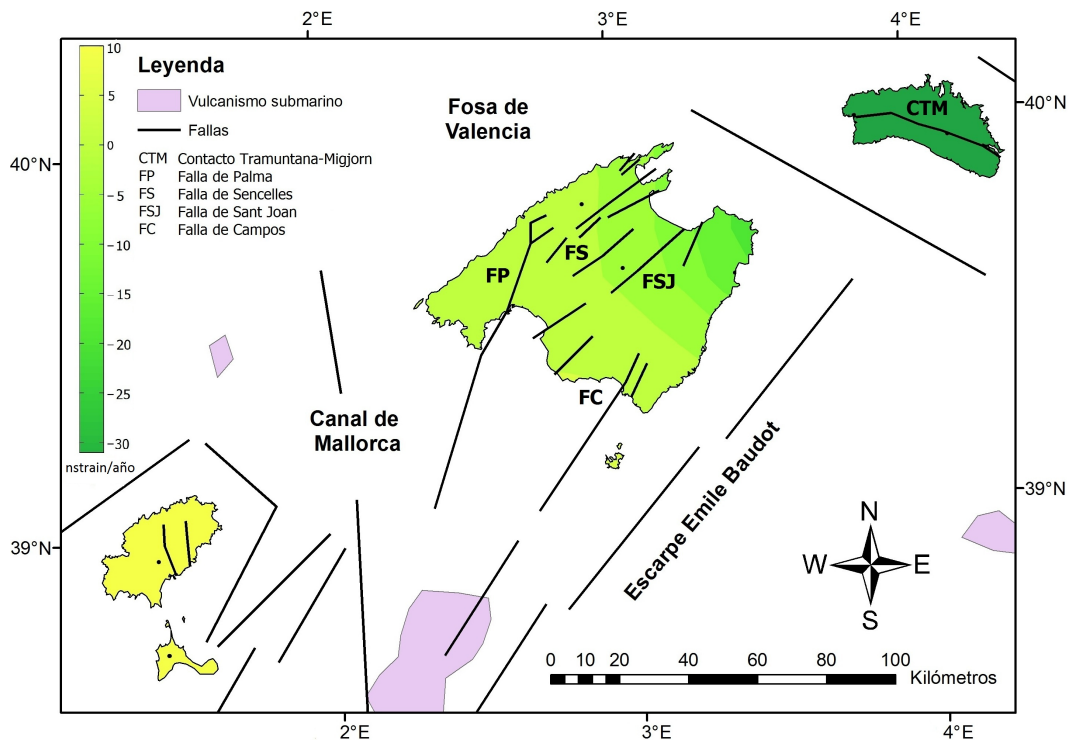


Figura 8.32: Mapa de deformación en el Archipiélago Balear. Los colores verdes indican predominancia de compresión y los amarillos de extensión. Unidades nstrain/año

# 9

## Interpretación de resultados

---

*“Conducir por orden mis pensamientos,  
comenzando por los objetos más simples y  
fáciles de conocer, para ascender poco a  
poco hasta el conocimiento de los más  
compuestos”*

René Descartes (1596-1650)

Una vez presentados los valores de velocidades y esfuerzos calculados en ambas zonas de estudio, este capítulo se centra en la interpretación de los resultados obtenidos como paso previo para definir las conclusiones de este trabajo. En concreto esta interpretación viene organizada, en primer lugar, con la validación de la metodología PPP y el software GOA utilizados; en segundo lugar se plantea la comparativa con distintas alternativas (longitud de los intervalos de la serie temporal y comparación con el software BSW) y, por último, se presenta el contraste de los resultados finales con las estructuras geológicas y tectónicas presentes a fin de obtener correspondencias.

### 9.1. Comparativa de metodología y aplicaciones

#### 9.1.1. Velocidad estimada en las estaciones de control

Las velocidades absolutas estimadas con el software CATS para las 5 estaciones de control EBRE, VALE, ALAC, ALME y MALL son coherentes con el desplazamiento general de la placa Euroasiática. En concreto, los resultados oscilan unos  $\pm 2$  mm/año, entre 17,81 – 20,29 mm/año para la componente Este y entre 15,54 – 17,06 mm/año para la componente Norte en todas las aplicaciones y programas PPP utilizados (Tabla 9.1).

9.- Interpretación de resultados

Velocidades absolutas								
Estación	APPS		CSRS-PPP		GOA		BSW-PPP	
	$V_E$	$V_N$	$V_E$	$V_N$	$V_E$	$V_N$	$V_E$	$V_N$
ALAC	19.41	16.24	18.66	16.70	20.05	16.13	19.18	16.95
ALME	18.71	16.10	17.81	17.06	18.97	16.17	18.66	16.66
EBRE	20.29	15.54	19.03	16.02	19.93	15.80	19.32	15.80
MALL	20.02	15.98	19.11	16.95	19.86	16.25	19.70	16.43
VALE	18.96	15.87	18.44	16.68	19.65	16.02	19.05	16.57

Tabla 9.1: Velocidades absolutas de las estaciones ALAC, ALME, EBRE, MALL y VALE estimadas por los servicios online APPS y CSRS-PPP así como por las aplicaciones GOA y BSW-PPP en el período 2009/001-2011/365 en mm/año.

En general, se observa que las series temporales calculadas con las opciones online (CSRS-PPP y APPS) y con la aplicación BSW-PPP, presentan una variabilidad mayor respecto a las obtenidas con el software GOA. Esto viene reflejado en los errores derivados de la estimación con CATS para las 5 estaciones (Tabla 9.2). En concreto en ambas componentes las magnitudes de error oscilan de promedio entre  $\pm 0,06$  /  $\pm 0,11$  mm/año para GOA,  $\pm 0,12$  /  $\pm 0,28$  mm/año para BSW-PPP,  $\pm 0,06$  /  $\pm 0,20$  mm/año para APPS y  $\pm 0,10$  /  $\pm 0,19$  mm/año para CSRS-PPP. La mayor variabilidad entre las distintas opciones corresponde al software BSW-PPP, aspecto que puede observarse además gráficamente en las series temporales. Esto concuerda con las posibilidades limitadas de esta aplicación para el procesado PPP comentado en [Hugentobler et ál. \(2006\)](#).

Errores de procesado								
Estación	APPS		CSRS-PPP		GOA		BSW-PPP	
	$\sigma E$	$\sigma N$	$\sigma E$	$\sigma N$	$\sigma E$	$\sigma N$	$\sigma E$	$\sigma N$
ALAC	0.20	0.13	0.11	0.10	0.10	0.10	0.28	0.17
ALME	0.13	0.07	0.16	0.14	0.06	0.06	0.18	0.11
EBRE	0.14	0.09	0.19	0.13	0.08	0.07	0.12	0.20
MALL	0.10	0.06	0.14	0.12	0.06	0.08	0.17	0.11
VALE	0.21	0.12	0.19	0.15	0.11	0.11	0.27	0.16

Tabla 9.2: Incertidumbres en las velocidades de las estaciones ALAC, ALME, EBRE, MALL y VALE estimadas por los servicios online APPS y CSRS-PPP así como por las aplicaciones GOA y BSW-PPP en el período 2009/001-2011/365 en mm/año.

Respecto a las velocidades y desviaciones obtenidas con la aplicación online APPS y el software GOA cabe destacar que son sensiblemente similares (Tablas 9.1 y 9.2). Esto se debe principalmente a que el algoritmo de procesado en ambas es análogo, con la diferencia de la posibilidad de incluir más opciones de cálculo en el software GOA respecto a su versión online (corrección de segundo orden de

ionosfera, modelización de troposfera, entre otros). Este hecho provoca una variación en la estimación de velocidad entre ambas opciones menor a 0,5 mm/año, en aquellas estaciones sin cambio de antena, e inferior a 0,75 mm/año en las estaciones ALAC y VALE. Es destacable además las diferencias observadas en la componente Este en estas últimas dos estaciones, con magnitudes que alcanzan los 0,65 y 0,69 mm/año respectivamente.

Hay que tener en cuenta que con el software GOA la entrada de información se puede realizar con un fichero de descripción detallado mientras que con APPS los datos se obtienen únicamente a partir de la cabecera del fichero RINEX de observaciones, lo que condiciona los parámetros de entrada. Además, es necesario considerar la presencia de saltos en la serie temporal que añade cierto grado de discrepancia a la estimación.

Un aspecto importante que influye en el cálculo de la velocidad es la homogeneidad del marco de referencia de las coordenadas de la serie temporal. Mientras que en el caso de las aplicaciones GOA, APPS y CSRS-PPP, el marco es coherente con IGS08 e ITRF2008, este aspecto es necesario solventarlo en el procesado con BSW, ya que se obtienen las coordenadas en el marco de referencia en el que estén definidos los ficheros auxiliares.

Esta eventualidad, aunque fue resuelta en el proceso de cálculo mediante una transformación de coordenadas entre los marcos de los ficheros auxiliares e IGS08, tiene que ser considerada a la hora de la interpretación de resultados, ya que añade mayor incertidumbre y desviación a la estimación. Este hecho concuerda con el aumento de variabilidad presentado con BSW-PPP, con desviaciones típicas superiores al resto de aplicaciones.

### **9.1.2. Ruido blanco en la serie temporal**

Para la comprobación numérica de los niveles de ruido de las series temporales de las estaciones de control, se dispone de un parámetro estimado con el software CATS que indica el nivel de ruido blanco de la serie temporal. Este dato permite cuantificar el nivel de dispersión independiente a la tendencia general lineal, determinada como dato de velocidad, y los componentes periódicos de la serie (Tabla 9.3).

A diferencia de las desviaciones asociadas a la estimación de velocidad, el ruido blanco da una información más completa sobre la dispersión sin tendencia propia de la serie al estar su magnitud en milímetros. En concreto se observa una menor incidencia del ruido blanco en la componente Norte en la aplicación BSW-PPP y en los servicios online CSRS-PPP y APPS. En estos casos las magnitudes están en torno a 3,00 – 3,56 mm de promedio en la componente Este y 1,86 – 2,31

mm de media en la componente Norte. En líneas generales el software BSW-PPP cuenta con valores superiores, que alcanzan el valor máximo en el promedio de la componente Este.

Ruido blanco								
Estación	APPS		CSRS-PPP		GOA		BSW-PPP	
	$\sigma E$	$\sigma N$	$\sigma E$	$\sigma N$	$\sigma E$	$\sigma N$	$\sigma E$	$\sigma N$
ALAC	2.83	1.80	2.86	2.33	1.37	1.38	3.63	2.17
ALME	3.48	1.98	3.33	2.67	1.61	1.54	3.50	2.09
EBRE	3.88	2.27	3.46	2.39	2.10	1.87	3.93	2.22
MALL	2.83	1.59	2.68	2.26	1.65	2.24	3.21	1.99
VALE	3.03	1.64	2.70	1.89	1.51	1.55	3.53	2.05

Tabla 9.3: Ruido blanco estimado en las estaciones ALAC, ALME, EBRE, MALL y VALE por los servicios online APPS y CSRS-PPP así como por las aplicaciones GOA y BSW-PPP en el período 2009/001-2011/365 en milímetros.

Por otro lado, el mejor comportamiento respecto al ruido blanco lo posee el software GOA, donde las magnitudes son similares en ambas componentes horizontales. Sus valores no superan en ningún caso los 2,5 mm y oscilan entre 1,65 y 1,72 mm de promedio para Este y Norte. Esto confirma los buenos resultados ya demostrados con el software GOA, con series temporales y velocidades derivadas con ruido blanco a un nivel reducido.

En relación a las diferentes estaciones de control, se observa que el ruido blanco estimado en la componente Este es un 40% superior que el correspondiente a la Norte. Este dato se confirma para todas las técnicas a excepción del software GOA donde la diferencia es despreciable. Las magnitudes oscilan entre 2,59 y 3,34 mm en Este y entre 1,78 y 2,29 mm en Norte. Destaca el mayor nivel de ruido observado en la estación EBRE en ambas componentes, que queda patente en la serie temporal para todas las técnicas con una mayor dispersión de los puntos respecto a la tendencia general (Figura 8.7). Esto puede ser debido a problemas en el horizonte de la estación, seguramente asociados a problemas por la presencia de vegetación cercana y obstáculos.

### 9.1.3. Desviaciones con otros valores de velocidad

En relación a la comparación de la técnica PPP con el procesado GPS relativo, la estimación con la serie temporal de EUREF es un buen indicador a la hora de contrastar los resultados. En este caso las variaciones son bastante homogéneas según la aplicación o software utilizado. Destaca que en todas ellas la desviación promedio con el procesado relativo no excede los 0,75 mm/año de magnitud,

demostrando la fiabilidad de la técnica PPP para series temporales superiores a tres años de longitud (Fernandes et ál., 2007).

Para la comparativa con una serie temporal de mayor longitud utilizando la misma técnica de procesado PPP, la serie del JPL permite realizar un contraste adecuado al tamaño de la serie. En concreto, las desviaciones detectadas permiten dividir claramente las técnicas online de los programas de procesado PPP, con diferencias promedio en estas últimas no superiores a 0,50 mm/año. Destaca el software GOA, con desviaciones que no exceden los 0,25 mm/año de promedio respecto a la velocidad estimada con la serie del JPL, lo que demuestra su fiabilidad con la técnica PPP. Por otro lado, la velocidad más diferenciada es la calculada con la serie temporal de la aplicación online CSRS-PPP, con magnitudes medias de 1,04 y 0,47 mm/año respectivamente para las componentes horizontales tal como se puede observar en la tabla 9.4.

Desviaciones respecto a la serie temporal de EUREF								
Estación	APPS		CSRS-PPP		GOA		BSW-PPP	
	$v_E$	$v_N$	$v_E$	$v_N$	$v_E$	$v_N$	$v_E$	$v_N$
ALAC	-0.78	-0.43	-1.53	0.03	-0.14	-0.54	-1.01	0.28
ALME	-0.02	0.08	-0.92	1.04	0.24	0.15	-0.07	0.64
EBRE	0.49	-0.37	-0.77	0.11	0.13	-0.11	-0.48	-0.11
MALL	0.26	-0.35	-0.65	0.62	0.10	-0.08	-0.06	0.10
VALE	-0.79	-0.25	-1.31	0.56	-0.10	-0.10	-0.70	0.45

Tabla 9.4: Velocidades residuales de las estaciones ALAC, ALME, EBRE, MALL y VALE respecto al modelo teórico GEODVEL con condición NNR, estimadas por los servicios online APPS y CSRS-PPP así como por las aplicaciones GOA y BSW-PPP, en el período 2009/001-2011/365 en mm/año.

Se perciben además unas desviaciones superiores en las aplicaciones online para las velocidades calculadas en las estaciones de ALAC y VALE; esto puede ser debido al cambio de antena producido en mitad de la serie temporal de ambas estaciones y a la imposibilidad de especificar esta eventualidad por internet en estas aplicaciones. De cualquier modo estas discrepancias no superan los  $\pm 0,55$  mm/año en el caso más desfavorable con CSRS-PPP.

#### 9.1.4. Desviaciones con el modelo teórico GEODVEL

En lo concerniente a la comparativa de las velocidades residuales obtenidas para los 5 puntos de control respecto al modelo teórico GEODVEL, se observa un buen ajuste general en todas las estaciones y con todas las técnicas (Tabla 9.5). Esta comparativa es importante ya que permite la detección de desplazamientos residuales respecto a la velocidad teórica de las estaciones sobre la placa Euroasiática, facilitando información sobre los niveles de esfuerzos en el área.

## 9.- Interpretación de resultados

En concreto las variaciones medias son inferiores a 1,5 mm/año en todas las estaciones, con un valor extremo de 2,20 mm/año en el caso de la estación ALME para la técnica CSRS-PPP. Se observa además que la dirección predominante de las velocidades residuales es hacia el N-NW, más acusado cuanto más cerca se encuentre la estación del área de convergencia de placas (Figuras 8.11 y 8.13).

Velocidades residuales respecto al modelo GEODVEL-NNR								
Estación	APPS		CSRS-PPP		GOA		BSW-PPP	
	$v_E$	$v_N$	$v_E$	$v_N$	$v_E$	$v_N$	$v_E$	$v_N$
ALAC	-0.63	0.61	-1.38	1.07	0.01	0.50	-0.86	1.32
ALME	-1.30	0.37	-2.20	1.33	-1.04	0.44	-1.35	0.93
EBRE	0.60	-0.03	-0.66	0.45	0.24	0.23	-0.37	0.23
MALL	-0.30	0.56	-1.21	1.53	-0.46	0.83	-0.62	1.01
VALE	-0.86	0.25	-1.38	1.06	-0.17	0.40	-0.77	0.95

Tabla 9.5: Velocidades residuales de las estaciones ALAC, ALME, EBRE, MALL y VALE respecto al modelo teórico GEODVEL con condición NNR, estimadas por los servicios online APPS y CSRS-PPP así como por las aplicaciones GOA y BSW-PPP, en el período 2009/001-2011/365 en mm/año.

Es especialmente destacable la estación EBRE, donde las velocidades residuales oscilan en las 4 aplicaciones con un valor promedio de 0,47 y 0,24 mm/año para las componentes Este y Norte respectivamente, lo que confirma el buen ajuste de la estación con el bloque estable de la placa Euroasiática. La estación ALME, por su parte, más cercana al área de convergencia con la placa Nubia, posee una velocidad residual con dirección predominante hacia el norte y oeste superior en todas las técnicas. Sus magnitudes promedio respecto al modelo teórico son de 1,47 mm/año para la componente Este y 0,77 mm/año para la Norte. Estos resultados estarían de acuerdo con estudios anteriores que inciden en un desplazamiento relativo hacia el oeste de esta zona respecto a la parte estable de Eurasia, tal como se muestra en [Koulali et ál. \(2011\)](#); [Nocquet \(2012\)](#); [Palano et ál. \(2013a\)](#) y [Echeverria et ál. \(2013\)](#).

Por su parte, la aplicación que mejor ajusta el modelo teórico GEODVEL a la velocidad estimada PPP en todas las estaciones es el software GOA, con variaciones promedio inferiores a 0,5 mm/año en las dos componentes horizontales. Por otro lado, la que presenta peor comportamiento es la aplicación online CSRS-PPP, con desviaciones respecto al modelo teórico que exceden los 1,25 mm/año de promedio en ambas componentes y para todas las estaciones. Esto demuestra un buen ajuste con el software GOA, tanto en variabilidad de la serie y niveles de ruido como respecto al modelo teórico utilizado, lo que constata la gran versatilidad y fiabilidad de este software a la hora de estimar velocidades con la técnica PPP.

En líneas generales se observa que las aplicaciones online presentan una desviación mayor respecto al modelo teórico que los programas especializados PPP. Independientemente de esto son opciones a tener en cuenta, ya que las desviaciones en series temporales de tres años y la variabilidad de las mismas permiten estimar un dato de velocidad coherente, comparable con los resultados derivados de campañas episódicas.

## **9.2. Estimación de velocidades en las distintas zonas de estudio**

El cálculo de la velocidad absoluta para las 34 estaciones procesadas con GOA concuerda con los datos de velocidad de la placa Euroasiática en esta zona, con dirección predominante SW-NE. Los resultados revelan unas magnitudes de velocidad que oscilan entre 17,20 y 21,27 mm/año en el caso de la componente Este y entre 14,81 y 17,60 mm/año para la componente Norte (Tabla 8.10). Debido a la longitud de la serie temporal, que excede el millar de puntos y tres años y medio de longitud de intervalo, las incertidumbres asociadas con la tendencia lineal calculadas con CATS no son muy elevadas, oscilando entre los  $\pm 0,04$  y  $\pm 0,08$  mm/año en el caso más desfavorable. Estos valores se determinan en función del número de saltos en la serie temporal, cambios de antena en la estación o lagunas por falta de observaciones, entre otros factores.

El comportamiento general respecto a las velocidades residuales estimadas con el modelo GEODVEL es coherente en la mayoría de las estaciones. Se destaca el buen ajuste en TERU, BORR y EBRE, con magnitudes de velocidad residual de 0,26; 0,46 y 0,56 mm/año respectivamente (Tabla 9.6) y sin una dirección predominante (Figura 8.24). Estos datos son coherentes con un movimiento solidario a la placa Euroasiática en estas estaciones, ya reflejado en trabajos anteriores (Fernandes et ál., 2007; Koulali et ál., 2011; Nocquet, 2012; Stich et ál., 2006). Además concuerda con el hecho de incluir el área peninsular al norte de las estaciones VALE y VCIA con la parte estable de la placa Euroasiática. Los valores residuales en estos casos no superan los 0,6 mm/año de magnitud global.

Las estaciones situadas en el sector oriental de la Cordillera Bética, coincidiendo geográficamente con la región de Murcia y la provincia de Alicante, tienen por su parte una velocidad residual con dirección predominante NNW-SSE. Esta tendencia es más acusada en algunas estaciones situadas al sur y próximas a la ciudad de Cartagena como MAZA (Figura 8.24), con una desviación que supera los 2 mm/año. En general existe una transición ligera hacia la dirección WNW-ESE cuanto más al oeste de esta región se considere, siendo más acentuada esta tendencia en las estaciones de la RAP, con magnitudes medias de desviación respecto al modelo teórico en torno a 1,5 – 2,0 mm/año. Dentro de las estaciones

situadas en Andalucía destaca la estación MOTR, en la costa meridional de Granada, que alcanza valores de 2,82 mm/año con una dirección WSW-ENE. Esta transición concuerda con los modelos tectónicos actuales, mostrando la misma dirección E-W de los vectores residuales en el área próxima a la confluencia de placas.

Velocidades residuales con el modelo GEODVEL					
Estación	Este	Norte	Estación	Este	Norte
ABAN	-0.47	1.51	JORD	0.18	0.98
ALAC	-0.40	0.65	JUMI	-0.26	0.63
ALCA	-0.20	1.08	MALL	0.05	1.15
ALCO	-0.67	0.89	MAZA	-0.73	1.93
ALME	-1.18	0.37	MENC	0.83	0.67
ALMR	-2.03	0.72	MORA	0.05	0.42
ALOR	0.13	0.95	MOTR	-2.65	-0.97
AYOR	-0.03	-0.80	MULA	-0.89	0.52
BONA	-0.24	1.49	MURC	-0.43	1.05
BORR	0.06	0.46	PALC	-1.59	0.45
CAAL	-1.51	0.25	SINE	0.14	1.01
CARA	-1.00	-0.11	TERU	0.00	0.26
EBRE	-0.30	0.47	TORR	-0.15	1.10
EIVI	-0.38	0.95	TRAM	-0.26	0.99
FORM	0.30	1.16	VALE	-0.83	0.80
GRA1	-1.05	0.47	VCIA	-0.64	0.56
HUOV	-0.34	1.02	VIAR	-1.26	-0.27

Tabla 9.6: Velocidades relativas de las estaciones de las zonas de estudio respecto al modelo teórico GEODVEL con condición NNR estimadas por el software GOA en el período 2010/090-2013/243 en mm/año

En el Archipiélago Balear, por su parte, las velocidades residuales tienen una magnitud y dirección análogas a las estaciones presentes en la zona de la región de Murcia y Alicante, con vectores predominantes en dirección norte. La magnitud promedio de esta desviación es homogénea en torno a 1,0 mm/año en casi todas las estaciones. Únicamente BONA presenta una variación mayor alcanzando los 1,5 mm/año. Aunque la tendencia general en las islas es similar a la que se observa en la costa oriental de Alicante, su magnitud muestra una reducción progresiva en la Isla de Menorca, con un cambio de dirección hacia el este.

### 9.2.1. Comparativa según intervalo de la serie temporal

La comparación entre la serie temporal de tres años y medio (2010/090-2010/243) respecto a la reducción de 6 meses (2010/090-2010/065) arroja varia-

ciones mínimas en la estimación de ambas componentes para todas las estaciones. En concreto las desviaciones no exceden los 0,35 mm/año, con la única excepción de la estación MORA con 0,67 mm/año de desviación máxima en la componente Norte. El nivel de las incertidumbres, por su parte, no se ve modificado en gran medida, ya que sigue oscilando con ambas series entre  $\pm 0,05$  y  $\pm 0,09$  mm/año (Figura 8.11).

La diferencia media entre ambas estimaciones es de  $\pm 0,19$  mm/año en la componente Este y de  $\pm 0,11$  mm/año en la norte, por lo que en la práctica la serie temporal de menor longitud da unos resultados bastante aceptables pese a su duración reducida. Las tendencias respecto al modelo teórico son similares con vectores prácticamente idénticos en módulo, dirección y sentido (Figura 8.26). En general, en aquellas estaciones con lagunas en la serie temporal o con cambios de antena, la desviación existente entre ambas series temporales es sensiblemente mayor, lo que confirma la relación directa entre la cohesión de la serie, su longitud y la precisión en la estimación de la velocidad.

### **9.2.2. Comparativa con el software Bernese 5.0**

En este caso, la comparativa de las velocidades estimadas con ambos programas pone de relieve las características propias del software BSW, influenciado por la presencia de distintos marcos en el período de procesado, y la propia naturaleza de sus algoritmos. De hecho, los errores asociados a BSW derivados de la estimación de velocidad con CATS tienen una magnitud comprendida entre 0,20 y 0,30 mm/año, superiores a los obtenidos con GOA, que en ningún caso excede los 0,10 mm/año de magnitud (Figura 8.12).

La diferencia BSW-GOA para todas las estaciones tiene un valor máximo aproximado de  $\pm 1,0$  mm/año en la componente Este, llegando hasta un valor pico de 1,5 mm/año para la componente Norte. Las desviaciones medias alcanzan magnitudes de entre 0,3 y 0,6 mm/año en todas las estaciones. En general se observa una tendencia a que el software BSW estime un valor en la componente Norte superior a su homólogo en GOA, lo que amplía la diferencia de BSW con el modelo teórico GEODVEL y se refleja directamente en los vectores de velocidad residual (Figura 8.28).

Otro aspecto destacado puesto de relieve es la relación existente entre la localización geográfica de la estación y el comportamiento de la componente Este. Las estaciones situadas en la zona sur de Andalucía y oeste de la Comunidad Murciana, todas ellas próximas al área de convergencia, presentan vectores residuales en BSW con una componente Este inferior respecto a GOA. Esta tendencia, sin embargo, no es tan acusada en la zona del Archipiélago Balear y las estaciones situadas más al norte.

### 9.3. Estimación de esfuerzos en las zonas de estudio

La magnitud de los esfuerzos estimados están en el orden de  $10^{-9}$  strain/año en ambas zonas de estudio, siendo los valores más acusados los obtenidos en las estaciones situadas en el área de confluencia de placas en el sector oriental de la Cordillera Bética. Existe una distribución de las componentes de esfuerzo dependiente de la estación y su área geográfica, siendo muy destacada la predominancia de extensión en la zona suroeste y de compresión en el sector oriental, que se pone de manifiesto en el mapa de contorno (Figura 8.30). Este comportamiento es el general en la región y también ha sido indicado en trabajos anteriores (Echeverría et ál., 2013; Fernandes et ál., 2007; Palano et ál., 2013a).

La magnitud de las componentes de esfuerzo muestra una dependencia según el área geográfica considerada. Por un lado es prácticamente nula en las estaciones más al norte del sector oriental de la Cordillera Bética, alejadas del área de contacto, con valores que en general no exceden los 10 nstrain/año (Tabla 8.13). El área de extensión de la zona suroeste posee valores en esta componente de entre 10 y 15 nstrain/año en dirección WSW-ENE, mientras que la zona de compresión en la región de Murcia, con dirección predominante NW-SE, alcanza magnitudes en torno a los 10 nstrain/año (Figura 8.29).

En el Archipiélago Balear, por su parte, la compresión es predominante en la Isla de Menorca con dirección NW-SE (Figura 8.31), apreciándose una cierta propagación en la zona más oriental de Mallorca (estación BONA) con magnitudes que superan los 30 nstrain/año. En la parte central de la Isla de Mallorca, los valores de esfuerzo son menores, no superándose en ningún caso los 10 nstrain/año en ambas componentes (Tabla 8.14). Respecto a las islas occidentales de Ibiza y Formentera, los esfuerzos predominantes son de extensión en torno a 20 nstrain/año en dirección WNW-ESE con compresión de la mitad de magnitud.

### 9.4. Correspondencia con trabajos anteriores y estructuras geológicas

#### 9.4.1. Sector oriental de la Cordillera Bética

La compleja geodinámica presente en el área de la Cordillera Bética queda modelizada de manera general con los datos obtenidos en esta tesis doctoral, aunque es necesario resaltar que la distribución y heterogeneidad de las estaciones permite únicamente una interpretación a escala regional.

Existe una diferenciación clara en el comportamiento de los esfuerzos en el sector más oriental de la Falla de Crevillente, ya que al norte de la misma la magnitud de la deformación se reduce sensiblemente (Figura 8.29). El entorno de la Falla de Alhama de Murcia y fallas anexas presenta una predominancia destacada de la compresión N-S, aspecto que se confirma en trabajos como el de Palano et ál. (2013a) y Echeverría et ál. (2013). De hecho, las estaciones situadas en la costa de Murcia (caso de MAZA) presentan una velocidad residual superior a las estaciones al norte de la falla de Alhama de Murcia y Crevillente.

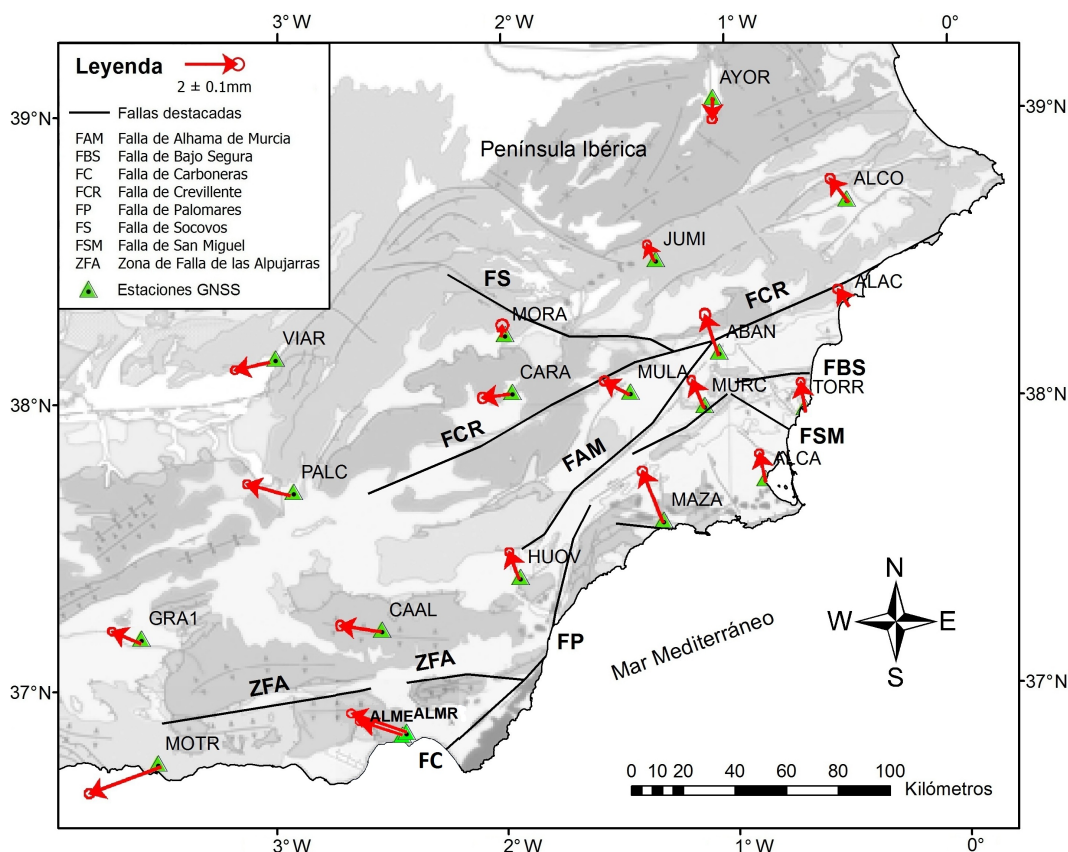


Figura 9.1: Campo de velocidad residual en el sector oriental de la Cordillera Bética obtenidos con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243, con elipses estándar y en mm/año

En la parte más suroccidental de esta zona de estudio, las velocidades residuales tienen una transición de dirección hacia WNW, coincidiendo en gran medida con los resultados de Echeverría et ál. (2013) en el área de Almería y sur de Murcia (Figura 2.16). En esta región la magnitud de los esfuerzos predominantes también son concordantes con los presentados por estos autores (Figura 2.17), con compresión N-S en la zona Murciana y extensión SW-NE en el área del Cabo de Gata. Todo ello es consistente con la transmisión de movimiento de la placa Nubia en su rotación antihoraria con la zona meridional de la Península Ibérica.

En el área de Granada y Almería, donde el campo de velocidades obtenido concuerda con la mayoría de trabajos previos, existe cierta discrepancia con los resultados publicados por [Mancilla et ál. \(2013\)](#). En dicho estudio se limita el desplazamiento solidario con la placa Nubia a un sector al oeste de la estación MOTR, determinado por un cambio brusco en las velocidades residuales. Este resultado difiere de la transición gradual que se obtiene en los cálculos con series temporales PPP presentado en este trabajo.

En líneas generales los resultados concuerdan con la geología y los trabajos sobre tectónica presentados previamente. La estructura de bloques en la zona de contacto quedaría demostrada por los valores numéricos, aunque debido a que esta tesis se centra en el sector más oriental de la Cordillera Bética solo puede modelizarse el bloque de transición al este de la Península Ibérica ([Vernant et ál., 2010](#)), presentado en la figura 2.9, con límite coincidente aproximadamente con la falla de Palomares (Figura 9.1).

### 9.4.2. Archipiélago Balear

Debido a que el Archipiélago Balear se encuentra alejado del área de convergencia de las placas Euroasiática y Nubia, la actividad sísmica y tectónica es mucho menor a la presentada en el sector oriental de la Cordillera Bética. Esto se ve reflejado sobre todo en la poca variabilidad en las velocidades residuales, la mayoría en torno a 1,0 mm/año de magnitud respecto al modelo teórico GEODVEL, con dirección predominante N-S.

Los resultados tanto de velocidad como de esfuerzos permiten la agrupación de las islas en 6 bloques según las fallas presentes (Figura 9.2). El primero de ellos corresponde a la isla de Menorca, con predominio de compresión, que englobaría las estaciones de ALOR y MENC. Las islas de Ibiza y Formentera, por su parte, tienen un comportamiento diferente respecto a los esfuerzos y constituyen dos bloques separados diferentes. La isla de Mallorca estaría dividida en tres áreas, en función de las estructuras presentes. Por un lado el bloque septentrional, que engloba la estación de TRAM, y que coincide con la zona de la Sierra de Tramuntana; como segundo bloque el área central, que corresponde a las cuencas neógenas centrales y, en tercer lugar, el grupo que incluye a la estación de BONA, perteneciente a las sierras del Llevant.

En relación al comportamiento de las velocidades de las estaciones según los bloques y la dinámica de las estructuras geológicas existentes, el bloque correspondiente a la isla de Menorca presenta velocidades diferentes al resto. Esta divergencia estaría de acuerdo con un movimiento dextro NW-SE de la falla presente en el Canal de Menorca. Por su parte, la componente Este en el bloque central de Mallorca tiene una magnitud mayor respecto al bloque de Ibiza, probablemente

relacionado con un movimiento dextro NW-SE de las fallas presentes en el canal de Mallorca. El movimiento extensional presente en las fallas N-S, o el movimiento sinistro de las fallas NE-SW localizadas entre Ibiza y Formentera, es consistente con una mayor velocidad hacia el este en el bloque de Formentera respecto al de Ibiza. Se observa, además, que la componente Norte del bloque correspondiente a las sierras del Llevant tiene una magnitud mayor respecto al bloque central de Mallorca, lo que probablemente esté relacionado con un movimiento sinistro de la falla de Llevant NNE-SSW.

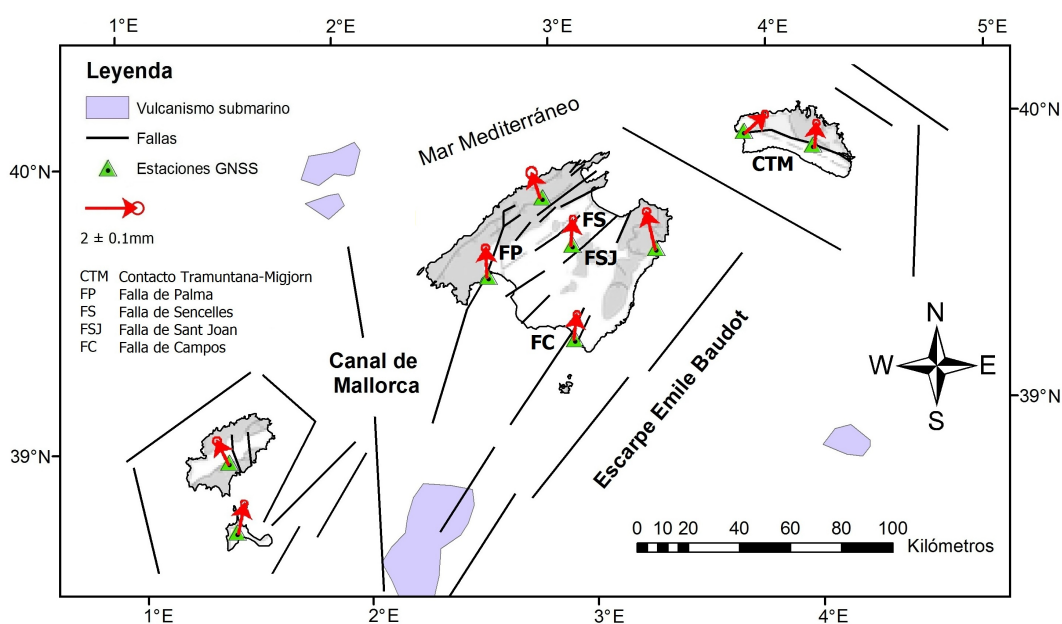


Figura 9.2: Campo de velocidad residual en el Archipiélago Balear obtenidos con el software GOA en el intervalo 2010/090-2013/243, con elipses estándar y en mm/año

Es importante destacar que la principal problemática que presentan las estaciones situadas en el archipiélago, y que lo diferencia de la zona de estudio en el sector oriental, es que la situación de las estaciones se ve condicionada con la localización geográfica de las islas. Este factor, aunque tiene influencia sobre las tasas de deformación obtenidas, no reduce el valor de los resultados al definir una primera aproximación importante a la geodinámica de la zona.



# 10

## Conclusiones

---

*“Realizar en todo unos recuentos tan completos y unas revisiones tan generales que pudiese estar seguro de no omitir nada”*

René Descartes (1596-1650)

### 10.1. Conclusiones generales

En la investigación que se desarrolla en esta tesis doctoral se ha determinado la deformación actual en el sector oriental de la Cordillera Bética y en el Archipiélago Balear a partir de datos GPS de 34 estaciones permanentes. Para ello se ha estimado un campo de velocidades en ambas zonas a partir de un procesado PPP diario correspondiente a un período de tres años y medio de observaciones. En paralelo a este cálculo se han comparado los distintos programas y aplicaciones online disponibles y se ha realizado la validación de la técnica para el intervalo de procesado.

La estructura de los resultados permite organizar las conclusiones de este trabajo en dos grandes bloques: Por un lado las conclusiones sobre la metodología, relativas a la validación del proceso, programas y aplicaciones utilizados y, por otro, las conclusiones sobre la geodinámica de la zona, relacionadas con la velocidad estimada, modelos de deformación y contraste con la información existente de estructuras geológicas presentes.

### 10.1.1. Conclusiones relativas a la metodología

- El software GOA es el que menos variabilidad aporta en la estimación de velocidad (desviaciones inferiores a 0,12 mm/año), el que calcula un dato de velocidad que mejor se ajusta al modelo GEODVEL (diferencias promedio inferiores a 0,5 mm/año) y el que tiene menores diferencias respecto a la serie temporal larga del JPL (inferiores a 0,25 mm/año de media en ambas componentes). Esta opción es por tanto adecuada para obtener un campo de velocidades con garantías y precisión en relación a los programas y aplicaciones online comparados.
- Respecto a las aplicaciones online APPS y CSRS-PPP, sus desviaciones y magnitudes de ruido blanco en la serie temporal son mayores en comparación con el software GOA. A pesar de esto, tienen un comportamiento aceptable en relación con las velocidades provenientes del posicionamiento relativo (diferencias en torno a  $\pm 0,5 - 1,0$  mm/año de media en ambas componentes). La aplicación canadiense CSRS-PPP es la que más se desvía del dato comparativo llegando hasta  $\pm 1,5$  mm/año de promedio en la componente Este.
- Los resultados demuestran que la aplicación PPP del software BSW es una alternativa factible a GOA para el procesado puntual de precisión pero que no puede competir al mismo nivel que el software del JPL. Las diferencias con el procesado relativo muestran unas desviaciones promedio que oscilan entre 0,3 – 0,5 mm/año. El hecho de tener que definir un offset en la serie con los cambios de marco de referencia en períodos largos de observación, la dispersión propia de la serie temporal y la arquitectura del algoritmo de cálculo, limitan la calidad de sus resultados.
- En relación a la cohesión de la serie temporal, los niveles de periodicidad y ruido blanco quedan correctamente determinados por el software de tratamiento CATS. La tendencia lineal estimada para las estaciones de control, relacionada con la variable velocidad absoluta, es coherente con los valores determinados por organismos e instituciones tales como EUREF y el JPL. Los niveles de ruido blanco no superan en el caso del software GOA los  $\pm 2,25$  mm de magnitud máxima, siendo menores a los determinados por las otras técnicas y aplicaciones PPP.
- Respecto a los diferentes intervalos de la serie temporal, las variaciones en la longitud más allá de los tres años de observación producen una modificación mínima en la estimación de la velocidad con el software GOA y para todas las estaciones (diferencias inferiores en su mayoría a  $\pm 0,35$  mm/año entre ambos períodos estudiados). Los resultados confirman además que los cambios de antena y huecos de observación en las estaciones influyen

negativamente en la calidad de la velocidad estimada (estaciones ALAC y VALE).

### 10.1.2. Conclusiones relativas a la geodinámica

- El comportamiento de las velocidades absolutas de las 34 estaciones distribuidas en el sector oriental de la Cordillera Bética y Archipiélago Balear es coherente con el movimiento tectónico del área y acorde con los modelos teóricos. La velocidad general tiene una dirección SW-NE con magnitudes vectoriales promedio de 25,4 mm/año en ambas zonas de estudio.
- El modelo teórico GEODVEL ha demostrado tener un comportamiento adecuado con las velocidades obtenidas mediante series temporales PPP, contrarrestando el movimiento propio de la placa Euroasiática en ambas áreas y permitiendo poner de relieve la velocidad residual propia de cada estación. Los resultados muestran un buen ajuste con diferencias inferiores a  $\pm 1,25$  mm/año en el caso de las estaciones de control e inferiores a  $\pm 2,75$  en el global de las 34 estaciones procesadas con GOA.
- El hecho de que las estaciones EBRE, BORR y TERU, situadas al norte de las zonas de estudio, tengan velocidades residuales despreciables respecto al modelo teórico GEODVEL (diferencias máximas inferiores a  $\pm 0,6$  mm/año) y valores de esfuerzo prácticamente nulos, confirma la pertenencia de estas estaciones a la parte estable de la placa Euroasiática. Esta conclusión está de acuerdo con los resultados de otros trabajos que indican que la zona difusa del límite de las placas Eurasia y Nubia se encuentra al sur de las estaciones VALE y VCIA.
- En la región de Murcia y Alicante existe una tendencia de velocidad residual general hacia el norte con una magnitud superior a 1,0 mm/año. Esta diferencia es más acusada en estaciones al sur de la Falla de Alhama de Murcia como MAZA, que alcanza valores superiores a 2,0 mm/año. El desplazamiento vendría asociado con el predominio de esfuerzos compresivos en la dirección NNW-SSE en la zona, coincidente con la presencia de fallas activas de salto en dirección sinistras e inversas. Estos vectores son asimismo análogos a los obtenidos por trabajos anteriores, donde se emplean técnicas de procesado relativo con series temporales y campañas episódicas.
- Los resultados confirman que las estaciones situadas al norte y sur de la Falla de Crevillente muestran comportamientos diferentes. Por un lado se observan mayores tasas de deformación en la zona meridional, en sectores próximos a la zona de falla de Alhama de Murcia, con magnitudes cercanas a 10-15 nstrain/año. Por otra parte, en el sector oriental donde se encuentra la zona de falla inversa del Bajo Segura, se observan valores de acortamiento de

10 nstrain/año. De cualquier modo, es importante destacar que los valores de desviación en algunas estimaciones de esfuerzo son elevados superando en algunos casos la magnitud del propio strain.

- En el área más occidental de la zona de estudio peninsular, coincidiendo con la región andaluza, las velocidades residuales tienen una tendencia que va rotando hacia la dirección EW, confirmando los resultados de anteriores trabajos (Echeverría et ál., 2013). Esta variación es gradual y afecta a la dirección de los vectores pero no a su magnitud que permanecen similares en toda el área. Los resultados confirmarían un desplazamiento solidario con la placa Nubia de las estaciones situadas al oeste de las fallas de Alhama de Murcia y Palomares, asociado con el predominio de extensión en la dirección WSW-ENE. En las tasas de deformación calculadas las magnitudes de extensión son elevadas, superando en algunos casos los 10 – 15 nstrain/año como es el caso de GRA1 y MOTR.
- Por su parte, en el área del Archipiélago Balear las velocidades residuales son análogas a las obtenidas en las zonas de Alicante y Murcia, con la excepción de una cierta variación hacia el este en la Isla de Menorca. Los esfuerzos confirman el predominio de extensión en las islas occidentales de Ibiza y Formentera en la dirección WNW-ESE (magnitudes de 20 nstrain/año) y de acortamiento NW-SE en Menorca (superiores a 35 nstrain/año). La isla de Mallorca posee una tasa de deformación de pequeña magnitud, inferior a 7,0 nstrain/año, pero con preponderancia de acortamiento en el área oriental próxima a la estación de BONA. Estos resultados permiten la generación de un primer modelo geodinámico en las islas y la clasificación del archipiélago en 6 bloques según la dinámica detectada y las fallas presentes.
- Es importante resaltar que las tasas de deformación en el Archipiélago Balear están asociados a la distribución de las estaciones en las diferentes islas, por lo que los valores calculados estarían hasta cierto punto condicionados por la situación de las estaciones. De cualquier modo la homogeneidad en las velocidades residuales que se observa, sin cambios bruscos en la dirección y sentido de los vectores, muestra una cohesión en el archipiélago que estaría relacionada con la baja sismicidad presente. Es necesario destacar que los resultados obtenidos en el Archipiélago Balear tienen un valor añadido, ya que se trata del primer modelo generado a partir de los datos de la red permanente XGAIB.

## 10.2. Trabajos futuros

Respecto a los posibles trabajos futuros, estos vienen derivados de los aspectos que han surgido en el desarrollo de esta tesis doctoral, ya sea en base a los datos

disponibles como en el procedimiento y software utilizados. En concreto se pueden contemplar los siguientes:

- Aumentar el área geográfica sometida a estudio en la zona sureste de la Península Ibérica, ampliando el número de redes utilizadas, con el uso de nuevas estaciones del IGN y regionales situadas más al oeste. Esto permitirá una mayor densificación del campo de velocidad y esfuerzos en la zona meridional de la Península, aumentando la precisión y confirmando los resultados obtenidos con un modelo más general del contacto de placas Eurasia/Nubia.
- Combinar los resultados PPP obtenidos con aquellos provenientes de observaciones mediante campañas episódicas, otras técnicas como puede ser el procesado relativo, redes permanentes como TopoIberia, y los trabajos desarrollados por otras instituciones y organismos. Esta coordinación permitirá validar los modelos y obtener un mayor conocimiento de la geodinámica regional de ambas zonas de estudio.
- Prolongar el intervalo de la serie temporal de las estaciones de cálculo más allá de los tres años y medio o cuatro años. Este aspecto, que en un principio ha limitado el uso de varias estaciones instaladas recientemente, facilitará por un lado la densificación interna de los resultados y, por otro, un modelizado de velocidad más preciso ajustado a las periodicidades presentes en cada estación GPS.
- Aplicar nuevos modelos de ruido blanco a las series temporales de las estaciones incluyendo nuevas herramientas matemáticas como estudios en el campo de la frecuencia y teoría de wavelets. Se pretende de este modo detectar las características concretas de las distintas estaciones según la situación geográfica, elevación, obstáculos, radiaciones cercanas e interferencias, actividad solar y otros aspectos que pueden afectar al registro de la señal GPS.
- Incluir nuevas componentes de periodicidad aparte de los de intervalo anual, semianual y quincenal originales. El objetivo es permitir una superposición de distintas fuentes de periodicidad en el modelizado de la velocidad facilitando un estudio específico de la monumentación, estabilidad del terreno y posibles dilataciones en las estaciones.
- Añadir en el procesado de la señal las observaciones provenientes de otros sistemas de posicionamiento espacial como GLONASS y Galileo. Este aspecto aumentará la precisión de los resultados y permitirá comparar las velocidades obtenidas con cada sistema en el ámbito del estudio de la geodinámica de áreas activas.

- Aprovechar los resultados de troposfera e ionosfera obtenidos como subproductos del procesado para generar modelos dinámicos atmosféricos. Estos estudios estarán relacionados temporalmente con la actividad solar fluctuante, coincidente con el máximo solar de 2013/2014, y espacialmente con las diferencias de altura de las estaciones, en algunos casos superiores a los 2000 metros, como ocurre entre CAAL y las estaciones situadas a nivel del mar.
- Utilizar la metodología desarrollada en esta tesis doctoral para poder aplicarla a otras zonas activas a escala local. Entre las posibles áreas de trabajo estarían aquellas con observaciones GPS episódicas anteriores a 1999 y reobservadas en la actualidad. En este caso el procesado PPP con el software GOA es de gran utilidad ya que permite obtener coordenadas en un marco de referencia homogéneo, facilitando la estimación de velocidad.
- Ampliar el muestreo de procesado PPP de los 300 segundos originales a intervalos menores como 30 o 5 segundos. De este modo se pretende aprovechar los nuevos productos de reloj a un muestreo elevado desarrollados por diversas instituciones, mejorar la calidad de resultados gracias a la superabundancia de datos en el modelo, y conseguir modelizar movimientos bruscos en la zona como terremotos y vibraciones estructurales.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, los posibles trabajos futuros se pueden clasificar en dos líneas de investigación principales:

- Por un lado se destacarían las investigaciones que se centran en la ampliación y mejora de los resultados de velocidad obtenidos en el sector más oriental de la Cordillera Bética y el Archipiélago Balear, a través de un mayor acceso a los datos, estaciones y áreas cercanas.
- Y por otro lado estarían los trabajos que se centran en obtener resultados asociados a través de los subproductos del procesado y la estimación de la velocidad, como son los modelizados de ionosfera, troposfera, cálculo de periodicidades y estudios de nivel de ruido de la señal GPS.

## Acrónimos

---

- AIUB** *Astronomical Institute of the University of Berne*. Instituto astronómico de la Universidad de Berna [http://www.aiub.unibe.ch/content/index\\_eng.html](http://www.aiub.unibe.ch/content/index_eng.html). 138
- AltBOC** *Alternative Binary Offset Carrier*. Tipo de modulación de la onda portadora utilizada en el sistema de posicionamiento Galileo. 75
- ANTEX** *ANTenna EXchange Format*. Fichero de calibración de antenas GNSS donde se incluyen los offsets y variaciones angulares. 106, 135, 139, 142, 177, 178, 181
- APPS** *Automatic Precise Positioning Service*. Servicio de Posicionamiento Preciso Automático facilitado por el JPL. <http://apps.gdgps.net/>. 133, 143, 144, 175, 183, 192, 222, 223, 236
- APV** *Antenna Phase Variations*. Variaciones del centro de fase de la antena y del satélite GNSS. 143
- ASCII** *American Standard Code for Information Interchange*. Formato de fichero de datos plano estándar. 137–139, 145, 176, 182
- BIH** *Bureau International de l'Heure*. Bureau Internacional de la Hora con sede en París (Francia). [http://www.iers.org/IERS/EN/IERSHome/home.html?\\_\\_nnn=true](http://www.iers.org/IERS/EN/IERSHome/home.html?__nnn=true). 52, 53, 65, 66
- BKG** *Bundesamt für Kartographie und Geodäsie*. Agencia Federal Alemana de Cartografía y Geodesia. [http://www.bkg.bund.de/nn\\_147094/EN/Home/homepage\\_\\_node.html\\_\\_nnn=true](http://www.bkg.bund.de/nn_147094/EN/Home/homepage__node.html__nnn=true). 161
- BPE** *Bernese Processing Engine*. Aplicaciones y scripts definidos en el software Bernese 5.0 que permiten el automatizado del procesado GNSS. 140, 180
- bps** *bits por segundo*. Unidad del Sistema Internacional utilizada para expresar la velocidad de transmisión de datos. 79

- BSW** *Bernese Software 5.0*. Software de procesado de la señal GNSS Bernese 5.0 facilitado por la Universidad de Berna <http://www.bernese.unibe.ch/>. 133, 138, 140–142, 175, 180–182, 193, 212, 221–224, 229, 236
- BTS** *BIH Terrestrial System*. Sistema Terrestre del Bureau Internacional de la Hora, antecesor de los marcos de referencia ITRF. 53, 66
- C/A** *Coarse/Acquisition*. Código específico emitido por los satélites de posicionamiento GNSS junto al código preciso P. 79, 82
- CARTOMUR** *Servicio de Cartografía de la Dirección General de Ordenación del Territorio de Murcia*. Servicio encargado del mantenimiento de la red murciana REGAM <http://cartomur.imida.es/regam/index.htm>. 167
- CATNET** *Red de estaciones GNSS permanentes de Cataluña*. Cuenta con servicio postproceso y de correcciones diferenciales. <http://catnet-ip.icc.cat/>. 162
- CATS** *Create and Analysis Time Series*. Programa de tratamiento y gestión de series temporales descrito en Williams (2008). 152, 189, 190, 193, 201, 221–223, 227, 229, 236
- CDMA** *Code division multiple access*. Acceso múltiple por división de código, método de acceso de la señal GNSS utilizado por GPS y Galileo. 73, 75
- CERCO** *Comité Européen des Responsables de la Cartographie Officielle*. Comité Europeo de Responsables de la Cartografía Oficial, antecesor del gestor de SIG europeo EuroGeographics <http://www.eurogeographics.org/>. 60
- CIGNET** *Cooperative International GPS Tracking Network*. Red de cooperación internacional para el seguimiento de la señal GPS con el objetivo de cubrir necesidades científicas y comerciales. 81
- CNSS** *Compass Navigation Satellite System*. Sistema de Posicionamiento Global Chino, también denominado Beidou-2. <http://en.beidou.gov.cn/>. 76
- CODE** *Center for Orbit Determination in Europe*. Centro de Determinación de Órbitas europeo que genera datos accesibles en <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE>. 95, 101, 107, 125, 142, 146
- CORS** *Continuously Operating Reference Station*. Red de estaciones de referencia permanentes con base en Estados Unidos. <http://geodesy.noaa.gov/CORS/>. 8, 129–132, 143
- CRS** *Celestial Reference System*. Sistema de referencia Celeste utilizado en geodesia como sistema de referencia global. 49

- CSRS** *Canadian Spatial Reference System*. Sistema de Referencia Espacial Canadiense basado en el Datum de Norteamérica NAD1983. <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/>. 133, 144, 148, 175, 183, 192, 222, 223, 225, 226, 236
- CTRF** *Conventional Terrestrial Reference Frame*. Marco de Referencia Terrestre Convencional como realización de un sistema de referencia terrestre (TRS). 51
- CTRS** *Conventional Terrestrial Reference System*. Sistema de Referencia Terrestre Convencional, generado al añadir origen, escala, orientación y evolución temporal a un sistema de referencia terrestre (Asamblea de la IUGG, 1991). 50–52, 65
- DCB** *Differential Code Biases*. Diferencias de código debido a los retardos electrónicos. Esta información se incluye en ficheros de calibración que se utilizan durante el procesado. 107, 125, 146, 182
- DGPS** *Differential Global Positioning System*. Posicionamiento Diferencial GPS en base a la observación simultánea de satélites desde varios receptores. 162
- DMA** *Defense Mapping Agency*. Agencia estadounidense que desarrolló sus trabajos desde 1972 a 1996 como antecesora del NIMA. Entre sus cometidos estaba el mantenimiento del sistema WGS84. 65
- DOP** *Dilution Of Precision*. Reducción de la precisión, término utilizado en posicionamiento GNSS para describir la calidad de la observación en función de la geometría de los satélites. 103
- DORIS** *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*. Radioposicionamiento y Orbitografía Doppler Integrada por Satélite. Sistema de seguimiento de satélites francés encargado de la determinación de órbitas. <http://ids-doris.org/>. 51, 53–56, 135, 187
- EBSZ** *Eastern Betic Shear Zone*. Estructura geológica correspondiente a la Zona de Cizalla de la Bética Oriental. 37–40
- ECMWF** *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. Centro Europeo para la predicción meteorológica de medio alcance <http://www.ecmwf.int/>. 145, 148
- EGM96** *Earth Gravitational Model 1996*. Modelo Gravitacional Terrestre 1996 fruto de la colaboración de las agencias estadounidenses NIMA, NASA y la Universidad Estatal de Ohio. 65
- EGU** *European Geosciences Union*. Unión Europea de Geociencias, con sede en Munich (Alemania) y establecida en 1992 <http://www.egu.eu/>. 56

- EOP** *Earth Orientation Parameters*. Parámetros de Orientación Terrestres definidos por el IERS y utilizados en el procesado GNSS. 54, 124, 139, 142, 151
- EPN** *European Permanent Network*. Red Europea Permanente de estaciones GNSS que constituye la base para el establecimiento del marco de referencia EUREF. <http://www.epncb.oma.be/>. 13, 20, 26, 27, 151, 157, 160, 161, 184, 192
- ERP** *Earth Rotation Parameters*. Parámetros de Rotación de la Tierra calculados, entre otros, por IGS y utilizados en el procesado GNSS. 146
- ERVA** *Estaciones de Referencia de Valencia*. Red de estaciones GNSS permanentes gestionada por el Institut Cartogràfic Valencià. <http://icverva.icv.gva.es:8080/>. 26, 157, 162, 163, 168, 176
- ESA** *European Space Agency*. Agencia Espacial Europea. Organización intergubernamental dedicada a la exploración espacial con 20 estados miembros. <http://www.esa.int/ESA>. 73
- ETRF** *European Terrestrial Reference Frame*. Marco de Referencia Terrestre Europeo. Realización del ETRS89 en base a un determinado ITRF. 61, 62
- ETRS89** *European Terrestrial Reference System 1989*. Sistema de Referencia Terrestre Europeo 1989. Sistema de referencia ligado a la parte estable de la placa continental europea adoptado por resolución de EUREF en 1990. 60–63, 160
- EUREF** *European Reference Frame*. Subcomisión de la IAG encargada de la definición del el Marco de Referencia Europeo. <http://www.euref-iag.net/>. 13, 20, 26, 27, 60–62, 151, 156, 157, 160, 162, 164, 168, 176, 177, 184, 186, 192, 224, 236
- FCB** *Fractional Cycle Biases*. Tendencias fraccionales de ciclo. Término utilizado en resolución de ambigüedades PPP. 125, 127–130
- FDMA** *Frequency Division Multiple Access*. Método de acceso de la señal de satélites utilizado por el sistema de posicionamiento GLONASS. 72
- FES** *Finite Element Solution*. Solución de elementos finitos. Modelo de carga oceánica desarrollado en su versión más utilizada FES2004 en [Letellier \(2004\)](#). 113, 146, 177, 185
- FOC** *Full Operational Capability*. Concepto que define la capacidad operacional completa de un sistema GNSS en el momento de su despliegue. 73
- FORTRAN** *FORmula TRANslating System*. Lenguaje de programación de alto nivel adaptado al cálculo numérico y a la computación científica. 138

- FTP** *File Transfer Protocol*. Protocolo de transferencia de ficheros vía internet. 58, 143, 148, 157, 161, 167, 176, 180, 184, 185
- GAPS** *GPS Analysis and Positioning Software*. Aplicación online de posicionamiento y análisis GPS que utiliza la técnica PPP. <http://gaps.gge.unb.ca/>. 133, 145, 148
- GCC** *Galileo Control Center*. Centro de Control del sistema Galileo encargado del mantenimiento de la constelación de satélites (GCS) y de los aspectos relativos al mensaje enviado (GMS). 74
- GCRS** *Geocentric Celestial Reference System*. Sistema de Referencia Celeste Geocéntrico. 51
- GCS** *Galileo Sensor Stations*. Red global de estaciones de seguimiento en el sistema Galileo encargadas de controlar el mensaje de navegación enviado por los satélites. 74
- GDGPS** *Global Differential GPS System*. Sistema GPS Diferencial Global. Este sistema es la base de la aplicación PPP online APPS para la resolución de ambigüedades PPP. 143
- GEODVEL** *GEODesy VELOCITY*. Modelo tectónico de velocidades descrito en [Argus et ál. \(2010\)](#). 187, 188, 190, 192, 193, 201, 212, 218, 225–227, 229, 232, 236, 237
- GIM** *Global Ionosphere Map*. Mapa ionosférico global generado por CODE y utilizado para modelizar el retardo ionosférico de la señal GNSS. 95, 143
- GIOVE** *Galileo In-Orbit Validation Element*. Designación de cada uno de los cuatro satélites que están siendo utilizados como elemento de validación del sistema Galileo. 73
- GIPSY-OASIS** *GNSS-Inferred Positioning SYstem and Orbit Analysis SIMulation Software*. Software de procesado PPP del JPL. <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>. 17, 99, 129, 131, 133–137, 142, 175, 177, 181, 185, 192, 201, 212
- GLONASS** *Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema*. Sistema de posicionamiento global de la Federación Rusa. <http://glonass-iac.ru/en/>. 2, 58, 69, 71–74, 76, 106, 108, 134, 135, 146, 148, 167, 239
- GMF** *Global Mapping Function*. Función de cartografiado de la troposférica utilizada para corregir los retardos de señal GNSS. Descrito en [Boehm et ál. \(2006\)](#). 144, 145, 148, 178
- GMT** *Generic Map Tool*. Herramienta de generación de cartografía vectorial y ráster en software libre. <http://gmt.soest.hawaii.edu/>. 188

- GMV** Empresa privada española con sede en Las Rozas (Madrid) especializada en el campo aeroespacial y en el tratamiento y gestión de la señal GNSS. <http://www.gmv.com/es/>. 146
- GNSS** *Global Navigation Satellite System*. Sistema de Navegación Global por satélite. Incluye actualmente a GPS, GLONASS, Galileo y Beidou. 2, 4, 20, 22–25, 49, 51, 54, 58–60, 69, 73, 75, 76, 94, 97, 107, 108, 117, 133, 134, 146, 148, 151, 155–160, 162, 164, 165
- GOA** *GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software*. Acrónimo del software PPP GIPSY-OASIS. <https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>. 133, 134, 136–138, 143, 148, 175, 177–183, 185, 186, 212, 221–229, 236, 237, 240
- GPRS** *General packet radio service*. Servicio de comunicación de datos vía móvil 2G y 3G para el envío de correcciones diferenciales a receptores GNSS. 167
- GPS** *Global Positioning System*. Sistema de Posicionamiento Global. 1, 3, 4, 7–16, 18, 19, 22, 24–30, 53–56, 58, 60, 65–67, 69, 70, 72–87, 89–91, 93, 94, 96–98, 100–102, 104–106, 108, 109, 115–118, 120, 121, 123, 124, 126, 131–139, 141, 144–146, 148–150, 152, 155, 159–161, 167, 177, 187, 212, 224, 235, 239, 240
- GPT** *Global Pressure and Temperature*. Modelo de Presión y Temperatura Global utilizado para el cálculo de las correcciones troposféricas en la señal GNSS. 145, 148
- GRS80** *Geodetic Reference System 1980*. Sistema de Referencia Geodésico 1980 adoptado por la XVII Asamblea General de la IUGG en Canberra (Australia). 65, 66
- GTRS** *Geocentric Terrestrial Reference System*. Sistema de Referencia Terrestre Geocéntrico. Término adoptado en la XXIV Asamblea General de la IUGG en Perugia (Italia) en 2007 y definido en la Nota Técnica 2010 del IERS como sistema base de los ITRS. 51, 52
- IAG** *International Association of Geodesy*. Asociación Internacional de Geodesia. Cuenta con comisiones específicas en sistemas de referencia, campo gravitatorio, rotación terrestre y posicionamiento. <http://www.iag-aig.org/>. 52, 58, 60, 160
- IAU** *International Astronomical Union*. Unión Astronómica Internacional. <http://www.iau.org/>. 52, 181
- IERS** *International Earth Rotation and Reference Systems Service*. Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia. [http://www.iers.org/IERS/EN/IERSHome/home.html?\\_\\_nnn=true](http://www.iers.org/IERS/EN/IERSHome/home.html?__nnn=true). 52, 53, 56, 60, 65–67, 142, 146, 181

- IGN** *Instituto Geográfico Nacional de España*. Dirección general del Ministerio de Fomento de España. Cuenta con servicios específicos en sismica, geodesia, cartografía y gravimetría. <http://www.ign.es/ign/main/index.do>. 176, 239
- IGP** *IGS Predicted*. Efemérides predichas IGS. Producto generado por el servicio IGS antecedente de las efemérides ultrarrápidas IGU. 99
- IGR** *IGS Rapid*. Efemérides Rápidas IGS. Efemérides orbitales GPS obtenidas por el servicio IGS con una latencia de aproximadamente 17 horas. 99
- IGS** *International GNSS Service*. Servicio Internacional GNSS compuesto por centros de datos, análisis y seguimiento de satélites GPS para la generación de productos de procesado. <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/overview/viewindex.html>. 54, 58–60, 67, 95, 99, 101, 105, 106, 123, 130, 135, 142–145, 147, 156, 162, 176, 177, 185
- IGU** *IGS Ultra rapid*. Efemérides Ultrarrápidas IGS. Efemérides orbitales GPS obtenidas por el servicio IGS y una latencia de seis horas. El producto se genera en cuatro ficheros diarios. 99
- ILRS** *International Laser Ranging Service*. Servicio Internacional de Telemetría Láser que realiza observaciones a retrorreflectores situados en satélites y en la luna. <http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>. 54, 56
- INSAR** *Interferometric synthetic aperture radar*. Sistema de radar interferométrico de apertura sintética. 7, 10
- IONEX** *IONosphere Map EXchange Format*. Formato de fichero de ionosfera que permite el cartografiado del contenido electrónico TEC en el procesado de la señal GPS. 145
- IOV** *In Orbit Validation*. Fase de validación en órbita del sistema Galileo, basado en los cuatro satélites GIOVE lanzados en 2005 y 2012, como paso previo a la operatividad completa del sistema. 73
- IP** *Ionospheric Piercing*. Punto de intersección de la señal GNSS enviada por el satélite con la ionosfera terrestre. Este punto es utilizado para el cálculo del retardo ionosférico en el procesado. 96, 97
- IRC** *Integer Recovery Clock*. Técnica de resolución de ambigüedades en PPP basada en la determinación de los parámetros enteros correspondientes al reloj. 129
- IRI** *International Reference Ionosphere*. Proyecto de Ionosfera de Referencia Internacional definida por los parámetros de densidad electrónica, temperatura y composición iónica. <http://iri.gsfc.nasa.gov/>. 179

- IRM** *IERS Reference Meridian*. Meridiano de Referencia del IERS, también denominado Meridiano de Referencia Internacional. 66
- ITRF** *International Terrestrial Reference Frame*. Marco de Referencia Terrestre Internacional. En sus diferentes versiones es la materialización física del ITRS. <http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html>. 11, 14, 17, 25, 53, 57–59, 61, 62, 66, 73, 139, 144, 145
- ITRS** *International Terrestrial Reference System*. Sistema de Referencia Terrestre Internacional. Constituye un conjunto de convenciones y variables propias de un CTRS. <http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRS/itrs.html>. 52, 53, 55–57, 59–61
- ITU** *International Telecommunication Union*. Unión Internacional de Telecomunicaciones, organización intergubernamental con sede en Ginebra (Suiza). <http://www.itu.int/en/Pages/default.aspx>. 97
- IUGG** *International Union of Geodesy and Geophysics*. Unión Internacional de Geodesia y Geofísica. <http://www.iugg.org/>. 50, 52, 66
- IVS** *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*. Servicio Internacional VLBI para la Geodesia y la Astrometría. <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/>. 54
- JPL** *Jet Propulsion Laboratory*. Laboratorio de Propulsión a Chorro perteneciente al Instituto de Tecnología de California con sede en Pasadena. <http://www.jpl.nasa.gov/>. 58, 106, 134, 137, 143, 151, 177, 185, 186, 192, 225, 236
- LEO** *Low Earth Orbit*. Acrónimo relativo a satélites cuya órbita se encuentra a una distancia sobre la superficie terrestre de entre 200 y 2000 kilómetros (órbita baja). 99, 124, 135
- LLR** *Lunar Laser Ranging*. Técnica de telemetría laser que utiliza los retrorreflectores situados en la superficie lunar. 53, 56
- M-SLM** *Modified Single-Layer Model*. Capa infinitesimal utilizada para el cálculo de los modelos ionosféricos globales. 96
- Ma** Unidad temporal en millones de años. 13, 34–36, 42, 43, 45, 46
- MBOC** *Multiplexed Binary Offset Carrier*. Tipo de modulación de la señal portadora que utiliza el sistema de posicionamiento Galileo. 75
- MCS** *Master Control Station*. Estación de Control Maestra o Principal dentro del Segmento de Control GPS. Se encuentra situada en Colorado Springs (Estados Unidos). 67, 80, 81, 100

- MLE** *maximum-likelihood estimation*. Estimación de máxima verosimilitud. Utilizado para el ajuste de modelo en una serie temporal con el programa CATS (Williams, 2008). 150, 152, 190
- MOPS** *Minimum Operational Performance Standards*. Utilizado para el modelado troposférico por la Comisión Radiotécnica para la Aeronáutica (RTCA). <http://www.rtca.org/documents>. 91
- MW** *Melbourne-Wübbena*. Combinación lineal para la detección de los saltos de ciclo en la señal. Utilizada también como apoyo para la resolución de ambigüedades (Melbourne, 1985; Wübbena, 1985). 102, 127–129, 181
- NAD83** *North American Datum 1983*. Datum de Norte América 1983 que actualizó el correspondiente al año 1927 como referencia en Estados Unidos. 144, 145
- NAVSTAR/GPS** *NAVigation System with Timing and Ranging/Global Positioning System* Constelación de 24 satélites utilizada para el posicionamiento GPS. 2, 69–71, 77
- NCEP** *National Centers for Environmental Prediction*. Centros de Predicción numérica para apoyo medioambiental. <http://www.ncep.noaa.gov/>. 145, 148
- NGA** *National Geospatial-Intelligence Agency* Agencia estadounidense encargada del mantenimiento de sistema WGS84. <https://www.nga.mil/Pages/default.aspx>. 65
- NGS** *National Geodetic Survey*. Servicio de geodesia y topografía en el ámbito de Estados Unidos. <http://www.ngs.noaa.gov/>. 144
- NIMA** *National Imagery and Mapping Agency* Agencia estadounidense que fue la encargada del mantenimiento del sistema WGS84. Fue sustituida por el actual NGA. 65
- NL** *Narrow-Lane*. Combinación lineal de observaciones de banda estrecha. Utilizada en la resolución de ambigüedades. 102, 127, 137
- NMF** *Niell Mapping Function*. Función Niell de Cartografiado de la troposfera. Utilizado en procesado GNSS para modelar el retardo de la señal a su paso por la atmósfera. 93, 145
- NNR** *No-Net Rotation*. Referido a un sistema inercial. Condición aplicada a un modelo tectónico teórico para que el momento angular de todas las placas sea igual a cero. 51, 52, 188, 190, 192, 193, 212, 218

- NNR-NUVEL1** *No-Net Rotation-Northwest University VELOCITY version 1*. Modelo teórico de velocidad tectónica definido en 1991 en [Argus y Gordon \(1991\)](#). 53, 187
- NNR-NUVEL1A** *No-Net Rotation-Northwest University VELOCITY version 1A*. Modelo teórico de velocidad tectónica definido en 1994 en [DeMets et ál. \(1994\)](#). 17, 19, 53, 54, 182
- NOAA** *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Agencia estadounidense encargada del estudio atmosférico y oceánico. <http://www.noaa.gov/>. 96
- NRCAN** *Natural Resources Canada*. Servicio de Recursos Naturales de Canadá encargado del mantenimiento de la aplicación PPP-CSRS. <https://www.nrcan.gc.ca/home>. 144, 145
- NTRIP** *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*. Protocolo de comunicaciones para el envío de correcciones diferenciales vía internet. 157
- ODTS** *Orbit Determination and Time Synchronization*. Algoritmos de procesamiento PPP utilizados en la aplicación online MagicGNSS. 146, 147
- OS** *Open Service*. Servicio abierto del sistema Galileo que permitirá el posicionamiento en tiempo real con precisiones por debajo del metro. 74, 75
- PCF** *Processing Control File*. Ficheros de procesamiento automático del software Bernese. Permiten la implementación de los scripts individuales en un único programa. 138, 140, 141, 182
- PCO** *Phase Center Offset*. Centro de fase de la antena. Vector definido entre el punto de calibración de la antena (ARP) y el centro de recepción de la señal (centro de fase). 104, 105, 178
- PCV** *Phase Center Variations*. Excentricidad del centro de fase de la antena. Vector variable definido entre el centro de fase de la antena y la dirección de llegada de la señal. 105, 106, 146
- PDF** *Portable Document Format*. Formato de impresión en fichero portable que sigue la norma ISO 19005-1:2005. 145, 147, 183
- PPP** *Precise Point Positioning*. Posicionamiento Puntual de Precisión. Técnica de posicionamiento que utiliza las observaciones no diferenciales desde un solo receptor GNSS. 2–4, 16, 17, 95, 109, 112, 115, 123–133, 135, 137, 141, 142, 144, 145, 147, 148, 175, 177, 180–183, 185, 186, 192, 193, 201, 212, 221–227, 232, 235–237, 239, 240

- PRN** *Pseudo Random Noise*. Ruido pseudoaleatorio asociado a las distintas señales transmitidas por los sistemas GNSS. 82, 83
- PZ-90** *Parametry Zemli 1990*. Sistema de coordenadas utilizado en GLONASS análogo al WGS84 del sistema GPS. La versión más reciente recibe el nombre de PZ-90.11. 73
- RAP** *Red Andaluza de Posicionamiento*. Red permanente de 22 estaciones GNSS localizadas en la Comunidad Autónoma de Andalucía y accesible en <http://www.ideandalucia.es/portal/web/portal-posicionamiento/rap>. 26, 27, 157, 168, 176, 227
- REGAM** *REd de GEodesia Activa de Murcia*. Red permanente de 12 estaciones GNSS localizadas en la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. <http://cartomur.imida.es/regam/index.htm>. 26, 157, 167, 168, 176, 177
- RINEX** *Receiver Independent Exchange Forma*. Formato de fichero orientado a almacenar observaciones obtenidas a partir de receptores GNSS. 82, 135, 138, 139, 141, 143–145, 157, 163–165, 167, 175–177, 181, 183, 192, 223
- RMS** *Root Mean Square*. Error medio cuadrático. Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las desviaciones individuales. 139, 186
- ROA** *Real Observatorio de la Armada de San Fernando*. Observatorio astronómico y geofísico adscrito a la Armada Española. <http://www.armada.mde.es/roa/>. 11, 18
- RTCA** *Radio Technical Commission for Aeronautics*. Comisión Radio-Técnica para Aeronáutica. <http://www.rtca.org/>. 91
- RTCM** *Radio Technical Commission for Maritime Services*. Estándar de comunicación vía radio para la emisión de correcciones diferenciales. 167
- RTK** *Real Time Kinematic*. Posicionamiento cinemático en tiempo real basado en correcciones diferenciales emitidas por una estación de referencia. 115, 156, 162
- SAI** *Sistema de Alimentación Ininterrumpida*. Dispositivo compuesto de baterías que permite la alimentación durante un tiempo limitado y el control de la tensión de entrada a otros dispositivos. 159, 167
- SINEX** *Solution (Software/technique) INdependent EXchange Format*. Formato estándar de soluciones de procesamiento GNSS. 139, 141, 182, 188
- SIRGAS** *Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*. Subcomisión de la IAG. <http://www.sirgas.org/index.php?id=15>. 9

- SITIBSA** *Serveis d'Informació Territorial de les Illes Balears, S.A.U.*. Servicio de Información Territorial de las Islas Baleares. <http://www.sitibsa.com/>. 164, 176
- SLR** *Satellite Laser Ranging*. Telemetría laser a satélites. Método preciso de medición de distancias mediante la emisión de pulsos de luz láser a satélites. 1, 51, 53–56, 61, 66, 135, 187
- SoL** *Safety of Life*. Servicio para Aplicaciones Críticas del sistema Galileo. Mejorará las prestaciones del Servicio Abierto mediante mensajes de integridad con la máxima cobertura mundial. 74
- SRP** *Solar Radiation Pressure*. Presión de radiación solar utilizado en el posicionamiento de la aplicación PPP online MagicGNSS. 146
- TAI** *Tiempo Atómico Internacional*. Estándar de tiempo calculado a partir de una media ponderada de las señales de relojes atómicos. <http://leapsecond.com/java/gpsclock.htm>. 78
- TASZ** *Trans-Alboran Shear Zone* Estructura correspondiente a la Zona de Cizalla Trans-Alboran situada al sur de la EBSZ. 37, 40
- TC** *Technique Centers*. Centros Técnicos del IERS situados en Pasadena (EEUU) para IGS, Greenbelt (EEUU) para IVS/ILRS y Ramonville (Francia) para IDS. <http://www.iers.org/IERS/EN/Organization/TechniqueCentres/TC.html>. 54
- TCG** *Geocentric Coordinate Time*. Tiempo Coordinado Geocéntrico. Destinado a ser utilizado como variable independiente de tiempo para los cálculos de precesión, nutación y satélites artificiales. 51
- TCP-IP** *Transmission Control Protocol - Internet Protocol*. Protocolo estándar de transmisión de datos vía internet. 167
- TEC** *Total Electron Content*. Contenido Total de Electrones. Parámetro utilizado en el procesado GNSS para estimar el retardo ionosférico. 94–97, 102, 126, 138, 178, 179
- TECU** *Total Electron Content Unit*. Unidad del contenido total de electrones que corresponde a  $10^{16}$  electrones/m<sup>2</sup>. 94
- teqc** *Toolkit for GPS/GLONASS Galileo/SBAS Beidou/QZSS data*. Herramienta de gestión de datos espaciales de UNAVCO. 135
- TIGO** *Observatorio Geodésico Integrado Transportable*. Proyecto chileno-alemán con sede en Concepción (Chile) cuya misión es la definición de sistemas globales de referencia. <http://www.tigo.cl/>. 9

- TIMATION** *TIME navigation*. Proyecto desarrollado en la década de 1960 por el Laboratorio de Investigación Naval de EEUU que buscaba la determinación de una referencia de tiempo precisa para las estaciones en tierra. 69
- TRANSIT/NAVSAT** *TRANSIT / Navy Navigation Satellite System*. Sistema de navegación por satélite estadounidense anterior al GPS y desarrollado en la década de 1960. 53, 65, 66, 69
- TRF** *Terrestrial Reference Frame*. Acrónimo genérico que refiere a un Marco de Referencia Terrestre. 51–53
- TRS** *Terrestrial Reference System*. Acrónimo genérico que refiere a un Sistema de Referencia Terrestre. 49–51
- UHF** *Ultra High Frequency*. Banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 300 MHz a 3 GHz. 69
- UNB3m** *University of New Brunswick 3m*. Modelo de troposfera de la Universidad de New Brunswick utilizado en la aplicación PPP online GAPS. 145
- UTC** *Universal Time Coordinated*. Tiempo Universal Coordinado. Estándar de tiempo (GMT o Zulu) obtenido a partir del Tiempo Atómico Internacional (TAI) restándole 35 segundos (válido desde el 1 de julio de 2012). 73, 78, 99
- UTM** *Universal Transversa Mercator*. Proyección cartográfica o sistema de coordenadas basado en una proyección transversal de Mercator. Divide la Tierra en 60 husos de 6° de longitud. 183, 190
- VHF** *Very High Frequency*. Banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 30 MHz a 300 MHz. 69
- VLBI** *Very Long Base Interferometry*. Interferometría de Muy Larga Base. Consiste en la observación simultánea de objetos celestes desde un conjunto de radiotelescopios. 1, 53–56, 61, 66, 81, 187
- VMF1** *Vienna Mapping Function 1*. Función de cartografiado de la troposfera desarrollada por la Universidad de New Brunswick (Canadá). <http://unb-vmf1.gge.unb.ca/>. 145, 148, 185
- vTEC** *Vertical Total Electron Content*. Contenido Total de Electrones en la componente vertical. Parámetro utilizado en el procesado GNSS para estimar el retardo ionosférico. 95, 96

**WGS72** *World Geodetic System 1972*. Versión previa al sistema geodésico WGS84. 65

**WGS84** *World Geodetic System 1984*. Sistema geodésico base del GPS definido en el reporte técnico NIMA 8350.2. 65–67, 99, 117

**WL** *Wide-Lane*. Combinación lineal de observaciones de banda ancha. Utilizada para la resolución de ambigüedades en PPP. 102, 126, 127, 131, 132, 136, 137

**XGAIB** *Xarxa de Geodèsia Activa de les Illes Balears*. Red de Geodesia Activa de las Islas Baleares. <http://xarxagnss.caib.es/spiderweb/frmRedirect.aspx?NeviId=NULL>. 157, 162, 164, 168, 176, 238

**ZPD** *Zenith Path Delay*. Retraso cenital de la señal, utilizado en la estimación de la troposfera durante el procesado GNSS. 90, 112, 135, 145, 182

**ZWD** *Zenith Wet Delay*. Retraso cenital húmedo de la señal, utilizado en la estimación de la troposfera durante el procesado GNSS. 144

## Referencias

---

- Abdelazeem, M., Farah, A., y Farrag, F. A. (2011). Assessment study of using online (CSRS) GPS-PPP service for mapping applications in Egypt. *Journal of Geodetic Science*, 1(3):233–239. 144
- Acosta, J., Ancochea, E., Canals, M., Huertas, M. J., y Uchupi, E. (2004). Early Pleistocene volcanism in the Emile Baudot Seamount, Balearic Promontory (Western Mediterranean Sea). *Marine Geology*, 207:247–257. 11
- Acosta, J., Canals, M., López-Martínez, J., Muñoz, A., Herranz, P., Urgeles, R., Palomo, C., y Casamor, J. L. (2002). The Balearic Promontory geomorphology (Western Mediterranean). Morphostructure and active processes. *Geomorphology*, 49:177–204. 11
- Acosta, J., Muñoz, A., Herranz, P., Palomo, C., Ballesteros, M., Vaquero, M., y Uchupi, E. (2001). Geodynamics of the Emile Baudot escarpment and the Balearic Promontory, Western Mediterranean. *Marine and Petroleum Geology*, 18:349–369. 11
- Adam, J., Augath, W., Boucher, C., Bruyninx, C., Dunkley, P., Gubler, E., Gurtner, W., Hornik, H., Marel, H. V., Schlüter, W., Seeger, H., Vermeer, M., y Zielinski, J. B. (2000). The European Reference System coming of age. *Geodesy Beyond 2000. International Association of Geodesy Symposia*, 121:47–54. 61
- Agnew, D. C. (1992). The Time-Domain behavior of power-law noises. *Geophysical Research Letters*, 19(4):333–336. 149
- Agria, J., Altamimi, Z., Boucher, C., Brockmann, E., Bruyninx, C., Caporali, A., Gurtner, W., Habrich, H., Hornik, H., Ihde, J., Kenyeres, A., Mäkinen, J., van Marel, H., Seeger, H., Simek, J., Stangl, G., y Weber, G. (2008). Status of the European Reference Frame (EUREF). *Observing our Changing Earth*, 133:47–56. 184
- Aktug, B., Meherremovb, E., Kurtc, M., Ozdemirc, S., Esedovb, N., y Lenk, O. (2013a). GPS constraints on the deformation of Azerbaijan and surrounding regions. *Journal of Geodynamics*, 67:40–45. 10

- Aktug, B., Parmaksiz, E., Kurt, M., Lenk, O., Kiliçoglu, A., Gurdal, M. A., y Ozdemir, S. (2013b). Deformation of Central Anatolia: GPS implications. *Journal of Geodynamics*, 67:78–96. 10
- Aktuğ, B. y Kilic, A. (2006). Recent crustal deformation of Izmir, Western Anatolia and surrounding regions as deduced from repeated GPS measurements and strain field. *Journal of Geodynamics*, 41:471–484. 10
- Alfaro, P. (1995). *Neotectónica de la Cuenca del Bajo Segura (Cordillera Bética Oriental)*. PhD thesis, Universidad de Alicante. 37
- Alfaro, P., Bartolomé, R., Borque, M. J., Estévez, A., García-Mayordomo, J., García-Tortosa, F. J., Gil, A. J., Gràcia, E., Lo-Iacono, C., y Perea, H. (2012). The Bajo Segura fault zone: Active blind thrusting in the Eastern Betic Cordillera (SE Spain). *Journal of Iberian Geology*, 38(1):271–284. 38
- Alfaro, P., Estévez, A., Blázquez, E. B., Borque, M. J., Garrido, M. S., Gil, A. J., de Lacy, M. J., Ruiz, A. M., Giménez, J., Molina, S., Rodríguez-Caderot, G., Ruiz-Morales, M., y Sanz de Galdeano, C. (2006). Geodetic control of the present tectonic deformation of the Betic Cordillera (Spain) in Geodetic Deformation Monitoring: From geophysical to engineering roles. *IAG Symposia Book Series*, 131:209–216. 11
- Allmendinger, R. W., Loveless, J. P., Pritchard, M. E., y Meade, B. (2009). From decades to epochs: Spanning the gap between geodesy and structural geology of active mountain belts. *Journal of Structural Geology*, 31:1409–1422. 7
- Aloi, D. y van Graas, F. (2004). Ground-multipath mitigation via polarization steering of GPS signal. *IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems*, 40(2):536–552. 110
- Altamimi, Z., Collilieux, X., y Métivier, L. (2011). ITRF2008: An improved solution of the International Terrestrial Reference Frame. *Journal of Geodesy*, 85:457–473. 55
- Altamimi, Z., Métivier, L., y Collilieux, X. (2012). ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research*, 117(B07402). 186
- Amir, S. y Musa, T. (2009). GPS zenith path delay estimation for meteorological applications: from low latitude to the mid latitude regions. *Seminar Faculty of Geoinformation Science and Engineering. Institut Ibnu Sina, Skudai*. 90
- Amiri-Simkooei, A. R., Tiberius, C. C. J. M., y Teunisen, P. J. G. (2007). Assessment of noise in GPS coordinate time series: Methodology and results. *Journal of Geophysical Research*, 112(B07413):591–603. 150

- 
- Anderle, R. J. (1976). Point positioning concept using precise ephemeris. In *Proceedings of the International Geodetic Symposium. October 12-14, 1976. Las Cruces (New Mexico)*. 123
- Andrei, C. O., Salazar, D., y Chen, R. (2010). Performance analysis of the Precise Point Positioning technique at BUCU IGS station. *Journal of Geodesy and Cadastre*, 10:9–20. 123, 127
- Antonelis, K., Johnson, D. J., Miller, M. M., y Palmer, R. (1999). GPS determination of current Pacific-North American plate motion. *Geology*, 27:299–302. 9
- Argus, D. F. y Gordon, R. G. (1991). No-net rotation model of current plate velocities incorporating plate rotation model NUVEL-1. *Geophysical Research Letters*, 18:2039–2042. 53, 250
- Argus, D. F., Gordon, R. G., Heflin, M. B., Ma, C., Eanes, R. J., Willis, P., Peltier, W. R., y Owen, S. E. (2010). The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy. *Geophysical Journal International*, 180:913–960. 187, 188, 190, 245
- Argus, D. F. y Heflin, M. B. (1995). Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from the Global Positioning System. *Geophysical Research Letters*, 22:1973–1976. 187
- ArRajehi, A., McClusky, S., Reilinger, R., Daoud, M., Alchalbi, A., Ergintav, S., Gomez, F., Sholan, J., Bou-Rabee, F., Ogubazghi, G., Haileab, B., Fisseha, S., Asfaw, L., Mahmoud, S., Rayan, A., Bendik, R., y Kogan, L. (2010). Geodetic constraints on present-day motion of the Arabian Plate. Implications for Red Sea and Gulf of Aden rifting. *Tectonics*, 29:TC3011. 8
- Ashby, N. (2003). Relativity in the Global Positioning System. *Living Reviews in Relativity*, 6(1). 108, 109
- Bar-Server, Y. E. (1996). A new model for GPS yaw attitude. *Journal of Geodesy*, 70:714–723. 107
- Bar-Server, Y. E., Kroger, P. M., y Borjesson, J. A. (1998). Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver. *Journal of Geophysical Research*, 103:5019–5035. 144, 178
- Barba, S., Carafa, M. M., Mariucci, M. T., Montone, P., y Pierdominici, S. (2010). Present day stress field modelling of southern Italy constrained by stress and GPS data. *Tectonophysics*, 482:193–204. 10
- Barbosa, R. C. (2010). China launches another navigation satellite-End 2010 with record 15 launches. *www.nasaspacesflight.com*. 76
-

- Bastos, L. y Landau, H. (1988). Fixing cycle slips in dual-frequency kinematic GPS-applications using kalman filtering. *Manuscripta Geodetica*, 13(4):249–256. 102
- Basu, S., LaBelle, J., Kudeki, E., Fejer, B. G., Kelley, M. C., Whitney, H. E., y Bushby, A. (1986). Gigahertz scintillations and spaced receiver drift measurements during project condor equatorial F region rocket campaign in Peru. *Journal of Geophysical Research*, 91(A5):5526–5538. 94
- Baueršima, I. (1982). NAVSTAR/Global Positioning System (GPS). *II Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald n° 7. Instituto Astronómico, Universidad de Berna*. 90
- Bedford, J., Moreno, M., Baez, J. C., Lange, D., Tilmann, F., Rosenau, M., Heidbach, O., Oncken, O., Bartsch, M., Rietbrock, A., Tassara, A., Bevis, M., y Vigny, C. (2013). A high resolution, time variable afterslip model for the 2010 Maule M8,8, Chile megathrust earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 383:26–36. 9
- Benavent, M. T. (2011). *Estudio metodológico del efecto oceánico indirecto y desarrollo de modelos de carga oceánica*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Matemáticas. 110
- Benedicto, J. y Ludwig, D. (2001). Galileo system architecture and services. *7th International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications (Sesimbra, Portugal)*. 74
- Berrocoso, M., Carmona, J., Fernández-Ros, A., Pérez-Peña, A., Ortiz, R., y García, A. (2010). Kinematic model for Tenerife Island (Canary Islands, Spain). Geodynamic interpretation in the Nubian plate context. *Journal of African Earth Sciences*, 58:721–733. 9
- Berrocoso, M., Ramírez, M. E., Pérez-Peña, A., Enríquez-Salamanca, J. M., Fernández, A., y Torrecillas, C. (2004). El Sistema de Posicionamiento Global. *Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz*. 80, 82, 83, 87
- Bertiger, W., Desai, S. D., Haines, B., Harvey, N., Moore, A. W., y Owen, S. (2010). Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. *Journal of Geodesy*, 84(5):327–337. 129, 131, 136, 142, 178, 186
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T., Rocken, C., Anthes, R., y Ware, R. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapour using the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research*, 97(D14):787–801. 90
- Bilitza, D. (2001). International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, 36(2):261–275. 179

- 
- Blewitt, G. (1989). Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km. *Journal of Geophysical Research*, 94:10187–10203. 126, 128, 131
- Blewitt, G. (1990). An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophysical Research Letters*, 17(3):199–202. 102, 127
- Boehm, J., Heinkelmann, R., y Schuh, H. (2007). Short note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81:679–683. 145
- Boehm, J., Werl, B., y Schuh, H. (2006). Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, 111. 145, 178, 245
- Bonforte, A. y Guglielmino, F. (2008). Transpressive strain on the Lipari Vulcano volcanic complex and dynamics of the La Fossa cone (Aeolian Islands, Sicily) revealed by GPS surveys on a dense network. *Tectonophysics*, 457:64–70. 10
- Borque, M. J. (2008). *Estudios geodésicos para el control de deformaciones en el Sector Oriental de la Cordillera Bética*. PhD thesis, Universidad de Cantabria. 11
- Bos, M. S., Bastos, L., y Fernandes, R. M. (2010). The influence of seasonal signals on the estimation of the tectonic motion in short continuous GPS time series. *Journal of Geodynamics*, 49:205–209. 149
- Boucher, C. (2001). Terrestrial coordinate systems and frames. *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, pages 3289–3292. 50
- Boucher, C. y Altamimi, Z. (1991). ITRF89 and other realizations of the ITRF terrestrial reference system for 1989. *IERS Technical Note 6. Observatoire de Paris*. 53, 62
- Boucher, C. y Altamimi, Z. (2011). Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. *École Nationale des Sciences Géographiques. IGN*. 62
- Braunmiller, J., Kradolfer, U., Baer, M., y Giardini, D. (2000). Regional moment-tensor inversion in the European-Mediterranean area. *Orfeus Electronic Newsletter*, 2(1):5. 48
- Bufo, E., Coca, P., Udías, A., y Lasa, C. (1997). Source mechanism of intermediate and deep earthquake in southern Spain. *Journal of Seismology*, 1:113–130. 40

- Bufo, E., Martín-Dávila, J., y Udías, A. (2004). Seismic sources on the Iberia-African plate boundary and their tectonic implications. *Pure and Applied Geophysics*, 161:623–646. 2
- Bus, Z., Grenerczy, G., Tóth, L., y Mónus, P. (2009). Active crustal deformation in two seismogenic zones of the Pannonian region - GPS versus seismological observations. *Tectonophysics*, 474:343–352. 10
- Butsch, F. (2007). Galileo signals, frequencies, performance, current activities, project status. *ICAO Aeronautical Spectrum Management Seminar (Nairobi, Kenia)*. 75
- Campbell, J. y Nothnagel, A. (2010). Intra-plate deformation in west-central Europe. *Journal of Geodynamics*, 49:130–140. 9
- Caporali, A., Aichhorn, C., Barlik, M., Becker, M., Fejes, I., Gerhatova, L., Ghi-tau, D., Grenerczy, G., Hefty, J., Krauss, S., Medak, D., Milev, G., Mojzes, M., Mulic, M., Nardo, A., Pesec, P., Rus, T., Simek, J., Sledzinski, J., Solaric, M., Stangl, G., Stopar, B., Vespe, F., y Virag, G. (2009). Surface kinematics in the Alpine Carpathian Dinaric and Balkan region inferred from a new multi-network GPS combination solution. *Tectonophysics*, 474:295–321. 10
- Caporali, A., Neubauer, F., Ostini, L., Stangl, G., y Zuliani, D. (2013). Modeling surface GPS velocities in the southern and eastern Alps by finite dislocations at crustal depths. *Tectonophysics*, 590:136–150. 9
- Castellote, M., Goula, X., Suriñach, E., Talaya, J., y Térmens, A. (2000). Red GPS CuaTeNeo en el SE de la Península Ibérica con fines geodinámicos. In *Proceedings de la II Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, S01-24 (63-64). 8-12 de Febrero, 2000. Lagos (Portugal)*. 11
- Cenni, N., Mantovani, E., Baldi, P., y Viti, M. (2012). Present kinematics of central and northern Italy from continuous GPS measurements. *Journal of Geodynamics*, 58:62–72. 10
- Chang, E. T., Chao, B. F., Chiang, C. C., y Hwang, C. (2012). Vertical crustal motion of active plate convergence in Taiwan derived from tide gauge, altimetry, and GPS data. *Tectonophysics*, 578:98–106. 8
- Chen, C. H., Wen, S., Yeh, T. K., Wang, C. H., Yen, H. Y., Liu, J. Y., Hobara, Y., y Han, P. (2013). Observation of surface displacements from GPS analyses before and after the Jiashian earthquake (m 6,4) in Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62:662–671. 8
- Chen, G. y Herring, T. A. (1997). Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. *Journal of Geophysical Research*, 102(B9):20489–20502. 145

- 
- Chin, M. M. (1992). GPS bulletin. *Publicación bimensual del US Department of Commerce (Washington DC)*. 81
- Chong, C. (2009). Status of COMPASS/BeiDou development. In *Proceedings of the Stanford's PNT Challenges and Opportunities Symposium. October 21-22, 2009. Kavli Institute (California)*. 76
- Chousianitis, K., Ganas, A., y Gianniou, M. (2013). Kinematic interpretation of present-day crustal deformation in central Greece from continuous GPS measurements. *Journal of Geodynamics*, 71:1–13. 10
- Collins, P. y Bisnath, S. (2011). Issues in ambiguity resolution for Precise Point Positioning. In *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011). September, 2011. Portland (Oregon)*. 129
- Collins, P., Bisnath, S., Francois, L., y Héroux, P. (2008a). Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. *Navigation*, 57(2):123–135. 129, 131
- Collins, P., Lahaye, F., Héroux, P., y Bisnath, S. (2008b). Precise Point Positioning with ambiguity resolution using the Decoupled Clock Model. In *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008). September, 2008. Savannah (Georgia)*. 129, 131
- Colomina, I., Fleta, J., Giménez, J., Goula, X., Masana, E., Ortiz, M. A., Santanach, P., Soro, M., Suriñach, E., Talaya, J., y Térmens, A. (1999). The CuaTeNeo GPS network to quantify horizontal movements in the Southeastern of the Iberian Peninsula. In *International Symposium: Assessment and reduction of natural risk. I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. 9-13 de Febrero, 1998. Almería (España)*. 28
- Conrad, C. y Lithgow-Bertelloni, C. (2002). How mantle slabs drive plate tectonics. *Science*, 298:207–209. 187
- CSRS (2004). On-line Precise Point Positioning 'how to use' document. *NRC. Natural Resources Canada*. 144
- Currenti, G., Napoli, R., y del Negro, C. (2011). Toward a realistic deformation model of the 2008 magmatic intrusion at Etna from combined DInSAR and GPS observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 312:22–27. 10
- Dach, U., Hugentobler, R., Fridez, R., y Meindl, P. (2007). Bernese GPS software version 5.0. *Astronomical Institute, University of Bern*. 108, 110, 138
-

- D'Agostino, N., Mantenuto, S., D'Anastasio, E., Avallone, A., Barchi, M., Colletti, C., Radicioni, F., Stoppini, A., y Fastellini, G. (2009). Contemporary crustal extension in the Umbria Marche Apennines from regional CGPS networks and comparison between geodetic and seismic deformation. *Tectonophysics*, 476:3–12. 10
- Dañobeitia, J. J., Arguedas, M., Gallart, J., Banda, E., y Makris, J. (1992). Deep crustal configuration of the Valencia trough and its Iberian and Balearic borders from extensive refraction and wide-angle reflection seismic profiling. *Tectonophysics*, 302:37–55. 11
- de Lacy, M. C., Gil, A. J., García-Armenteros, J. A., Ruíz, A. M., Crespi, M., y Mazzoni, A. (2012). A new continuous GPS network to monitor deformations in the Iberian Peninsula (Topo-Iberia Project). First study of the situation of the Betic System Area. *International Association of Geodesy Symposia*, 137:387–392. 24
- de Lacy, M. C., Reguzzoni, M., Sansó, F., y Venuti, G. (2008). The bayesian detection of discontinuities in a polynomial regression and its application to the cycle-slip problem. *Journal of Geodesy*, 82(9):527–542. 102
- de Larouzière, F. D., Bolze, J., Bordet, P., Hernández, J., Montecat, C., y Ott-d'Estevou, P. (1988). The Betic segment of the lithospheric Trans-Alboran shear zone during the late Miocene. *Tectonophysics*, 152:41–52. 37
- Decriem, J. y Árnadóttir, T. (2012). Transient crustal deformation in the south Iceland seismic zone observed by GPS and InSAR during 2000-2008. *Tectonophysics*, 581:6–18. 9
- Delporte, J., Mercier, F., Laurichesse, D., y Galy, O. (2008). GPS carrier-phase time transfer using single-difference integer ambiguity resolution. *International Journal of Navigation and Observation*, 2008. 129
- DeMets, C., Gordon, R. G., y Argus, D. F. (2010). Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181:1–80. 187
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., y Stein, S. (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters*, 21:2191–2194. 17, 53, 54, 182, 250
- Desai, S. y Bertiger, W. (2012). Static and kinematic Precise Point Positioning with gd2p.pl - GNSS data 2 position. *Jet Propulsion Laboratory. Caltech*. 136, 177
- Devoti, R., Esposito, A., Pietrantonio, G., Pisani, A. R., y Riguzzi, F. (2011). Evidence of large scale deformation patterns from GPS data in the Italian subduction boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 311:230–241. 10

- Devoti, R., Riguzzi, F., Cuffaro, M., y Doglioni, C. (2008). New GPS constraints on the kinematics of the Apennines subduction. *Earth and Planetary Science Letters*, 273:163–174. 10
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H. R., y Tavakoli, F. (2011). NW Iran eastern Turkey present day kinematics. Results from the Iranian Permanent GPS Network. *Earth and Planetary Science Letters*, 307:27–34. 8
- Dragert, H., James, T. S., y Lambert, A. (2000). Ocean loading corrections for continuous GPS. A case study at the canadian coastal site Holberg. *Geophysical Research Letters*, 27(14):2045–2048. 112
- Drake, S. P. (2002). *Converting GPS coordinates to navigation coordinates*. Defence, Science and Technology Organisation (DSTO). Electronics and Surveillance Research Laboratory. 189
- Dubey, S., Wahi, R., y Gwal, A. K. (2005). Effect of ionospheric scintillation on GPS receiver at equatorial anomaly region Bhopal. In *Proceedings of the XXVIIIth General Assembly of the Union Radio-Scientifique Internationale. October, 2009. New Delhi (India)*. 94
- Durán, J. J., Mateos, R. M., López, J. M., Robledo, P. A., García, A., López, J. A., Barón, A., González, C., González, J., Galán, G., Arco, T., y González, J. (2006). *Islas de Agua: Patrimonio geológico e hidrogeológico de las Islas Baleares*. Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y Conselleria de Medi Ambient. Govern Balear. 43, 44, 45
- Dzurisin, D. (2007). Volcano deformation. Geodetic monitoring techniques. *Praxis Publishing Limited. Chinchester. UK*. 8, 9
- Echeverria, A., Khazaradze, G., Asensio, E., Gárate, J., Martín-Dávila, J., y Suriñach, E. (2013). Crustal deformation in eastern Betics from CuaTeNeo GPS network. *Tectonophysics*. XIX, XIX, 28, 29, 30, 38, 39, 226, 230, 231, 238
- El-Fiky, G. S., Kato, T., y Oware, E. N. (1999). Crustal deformation and inter-plate coupling in the Shikoku district, Japan, as seen from continuous GPS. *Tectonophysics*, 314(4):387–399. 8
- Ergintav, S., McClusky, S., Hearn, E., Reilinger, R., Cakmak, R., Herring, T., Ozener, H., Lenk, O., y Tari, E. (2009). Seven years of postseismic deformation following the 1999 M7,4 and M7,2 Izmit-Düzce, Turkey earthquake sequence. *Journal of Geophysical Research*, 114(B07403). 149
- Fadil, A., Vernant, P., McClusky, S., Reilinger, R., Gómez, F., Ben-Sari, D., Mourabit, T., Feigl, K., y Barazangi, M. (2006). Active tectonics of the Western Mediterranean: Evidence for roll-back of a delaminated subcontinental lithospheric slab beneath the Rif Mountains Morocco. *Geology*, 34:529–532. XIX, XIX, 11, 12, 13, 22

- Faulkner, D. R., Lewis, A. C., y Rutter, E. H. (2003). On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: Field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain. *Tectonophysics*, 367(3-4):235–251. 37
- Fernandes, R. M., Ambrosius, B. A., Noomen, R., Bastos, L., Wortel, M. J., Spakman, W., y Govers, R. (2003). The relative motion between Africa and Eurasia as derived from ITRF2000 and GPS data. *Geophysical Research Letters*, 30(16). 11, 17
- Fernandes, R. M., Miranda, J. M., Neijninger, B. M., Bos, M. S., Noomen, R., Bastos, L., Ambrosius, B. A., y Riva, R. E. (2007). Surface velocity field of the Ibero-Maghrebian segment of the Eurasia-Nubia plate boundary. *Geophysical Journal International*, 169:315–324. XIX, 2, 16, 17, 225, 227, 230
- Franco, S. I., Kostoglodov, V., Larson, K. M., Manea, V. C., Manea, M., y Santiago, J. A. (2005). Propagation of the 2001-2002 silent earthquake and interplate coupling in the Oaxaca subduction zone, Mexico. *Earth Planets Space*, 57:973–985. 9
- Frizon de Lamotte, D., Jarrige, J. J., y Vidal, J. C. (1980). Le magmatisme bético-rifain est-il lié à une zone d'accidents décrochants "Trans-Alboran"? *Huitième Reunion Annuelle des Sciences de la Terre. Abstracts Société Géologique de France, Marseille*. 37
- Fu, Y. y Freymueller, J. T. (2013). Repeated large slow slip events at the southcentral Alaska subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 375:303–311. 9
- Fuhrmann, T., Heck, B., Knopfler, A., Masson, F., Mayer, M., Ulrich, P., Westerhaus, M., y Zippelt, K. (2013). Recent surface displacements in the Upper Rhine Graben. Preliminary results from geodetic networks. *Tectonophysics*, 602:300–315. 9
- Galgana, G. A., Newman, A. V., Hamburger, M. W., y Solidum, R. (2013). Geodetic observations and modeling of time-varying deformation at Taal Volcano, Philippines. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 8
- Galindo-Zaldívar, J., Borque, M. J., Pedrera, A., Marín-Lechado, C., Gil, A. J., y López-Garrido, A. C. (2013). Deformation behaviour of the low rate active Balanegra Fault Zone from high-precision levelling (Betic Cordillera, SE Spain). *Journal of Geodynamics*, 71:43–51. 11
- Gallastegui, J., Pulgar, J. A., González-Cortina, J. M., Gárate, J., Martín-Dávila, J., Khazaradze, G., Gil, A. J., Ruíz, A. M., Jimenez-Munt, I., Ayala, C., Tellez, J., Rodríguez Caderot, G., Ayarza, P., y Álvarez Lobato, F. (2008). Despliegue de estaciones GPS permanentes en el marco del proyecto Topo-Iberia. *GeoTemas*, 10. 24

- 
- Gan, W. J., Zhang, P. Z., Shen, Z. K., Niu, Z. J., Wang, M., Wan, Y. G., Zhou, D. M., y Cheng, J. (2007). Present day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 112(B8). 8
- Ganas, A., Marinou, A., Anastasiou, D., Paradissis, D., Papazissi, K., Tzavaras, P., y Drakatos, G. (2013). GPS-derived estimates of crustal deformation in the central and north Ionian Sea, Greece: 3-yr results from NOANET continuous network data. *Journal of Geodynamics*, 67:62–71. 10
- Gao, Y. y Shen, X. (2002). A new method for carrier phase based on Precise Point Positioning. *Journal of the Institute of Navigation*, 40(2). 128
- GAPS (2013). Analysis strategy summary. *Dept. of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick*. 146
- Garate, J., Martín, J., Suriñach, E., Berrocoso, M., Pérez-Peña, A., y Talaya, J. (2003). CuaTeNeo Network: Preliminary results after first reobservation. *Geophysical Research Abstract. European Geophysical Society*, 5. 28
- García-Mayordomo, J. (2005). *Caracterización y análisis de la peligrosidad sísmica en el Sureste de España*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid. 38, 39
- García-Mayordomo, J. y Martínez-Díaz, J. J. (2006). Caracterización sísmica del Anticlinorio del Bajo Segura, Torrevieja y San Miguel de Salinas. *Geogaceta*, 40:19–22. 37
- Gardner, M. (1978). Mathematical Games: White and brown music, fractal curves and one-over-f fluctuations. *Scientific American*, 238(4):16–32. 152
- Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., y Liu, J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82(7):389–399. 128, 129, 130
- Geiger, A. (1988). Einfluss un bestimmung der variabilität des phasenzentrums von GPS-antennen. *Mitteilungen des IGP der ETH-Zürich*, 43:1–66. 105
- Gelabert, B. (1998). *La Estructura Geológica de la mitad occidental de la Isla de Mallorca*. Colección Memorias del I.T.G.E. 34, 42
- Gelabert, B., Fornós, J. J., Pardo, J. E., Rosselló, V. M., y Segura, F. (2005). Structurally controlled drainage basin development in the south of Menorca (Western Mediterranean, Spain). *Geomorphology*, 65:139–155. 11, 43
- Gendt, G. (2006). IGS switch to absolute antenna model and ITRF2005. *IGS Mail n° 5438, IGS Central Bureau Information System*. 105
-

- Geng, J., Meng, X., Dodson, A. H., y Teferle, F. N. (2010a). Integer ambiguity resolution in Precise Point Positioning: Method comparison. *Journal of Geodesy*, 84:569–581. 130
- Geng, J., Meng, X., Teferle, F. N., y Dodson, A. H. (2008). Hourly Precise Point Positioning with ambiguity resolution. *IESSG, University of Nottingham. Octubre 2008*. 128
- Geng, J., Teferle, F. N., Meng, X., y Dodson, A. H. (2010b). Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time Precise Point Positioning. *Advances in space research*, 47(10):1664–1673. 130
- Geng, J., Teferle, N., Laurichesse, D., Ahmed, F., Meng, X., Dodson, A., y Bingley, R. (2012). Integer ambiguity resolution in Precise Point Positioning: Method comparison and real-time application. In *Proceedings of the EUREF 2012 Symposium. June 6-8, 2012. Paris (France)*. 131
- Gil, A. J., de Lacy, M. C., Borque, M. J., Ruiz, A. M., Garrido, M. S., Ramos, M. I., Armenteros, J. A., Herrera, A., y Giménez, E. (2011). Sobre el control de la deformación de la Cordillera Bética por técnicas geodésicas. *Mapping*, 146:55–61. 11
- Gil, A. J., de Lacy, M. C., Ruiz, A. M., Armenteros, J. A., Adán, R., Avilés, M., Riguzzi, F., y Devoti, R. (2012). Red GPS Topo-Iberia: Resultados preliminares obtenidos en el Centro de Análisis de la UJA. In *Proceedings de la VII Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. 25-29 de Junio, 2012. San Sebastián (España)*. 24
- Gil, A. J., Rodríguez-Caderot, G., de Lacy, M. C., Ruíz, A. M., Sanz de Galdeano, C., y Alfaro, P. (2002). Establishment of a non-permanent GPS network to monitor the recent NE-SW deformation in the Granada basin (Betic Cordillera, Southern Spain). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 46:395–410. 11
- Gil, A. J., Ruíz, A. M., Borque, M. J., Rodríguez-Caderot, G., de Lacy, M. C., Sanz de Galdeano, C., Alfaro, P., Ruíz, M., Crespi, M., y Biagi, L. (1999). Ground deformation monitoring in the central sector of Betic Cordillera (Spain) from geodetic techniques: Status report. *International Union of Geodesy and Geophysics. Birmingham. UK*. 11
- Gil de la Iglesia, A. (2008). Estudio de fallas activas en la Cordillera Bética Oriental entre 3°-0° W y 36°30'-38°30' N. Master's thesis, Universitat de Barcelona, Facultat de Geologia, Departament de Geodinàmica i Geofísica. 37, 39, 40
- Giménez, J. (1993). *Análisi de dades d'anivellació d'alta precisió. Valoració de la seva possible aplicació a l'estudi dels moviments verticals a Catalunya*. PhD thesis, Universidad de Barcelona. 10

- 
- Giménez, J. (2003). Nuevos datos sobre la actividad post-Neógena en la Isla de Mallorca. *Geogaceta*, 33:79–82. 11, 47
- Giménez, J. (2008). Evaluación de la peligrosidad sísmica de Baleares. In *Proceedings del VII Congreso Geológico de España. 14-18 de julio de 2008. Las Palmas de Gran Canaria (España)*. 47
- Giménez, J., Fornós, J. J., y Gelabert, B. (2002). Análisis de la fracturación de los materiales calcáreos neógenos de la costa sudoriental de Mallorca. *Geogaceta*, 31:91–94. 11, 47
- Giménez, J., Gelabert, B., y Sàbat, F. (2007). El relieve de las Islas Baleares. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15:175–184. 44, 46
- Giménez, J., Suriñach, E., Fleta, J., y Goula, X. (1996). Recent vertical movements from high-precision leveling data in northeast Spain. *Tectonophysics*, 263:149–161. 10
- Gülal, E., Erdogan, H., y Tiryakiglu, I. (2013). Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis. *Digital Signal Processing*, 23:1945–1957. 150, 157
- GMV (2008). Nueva línea de productos GNSS. *GMV Innovating Solutions News*, 18:39. 147
- Goad, C. C. y Goodman, L. (1974). A modified hopfield tropospheric refraction correction model. Presented Paper, AGU Annual Fall Meeting, San Francisco (CA). 92
- Golonka, J. (2007). Late Triassic and early Jurassic palaeogeography of the world. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 244:297–307. 187
- Gárate, J., Berrocoso, M., Martín, J., Catalán, M., y Hernández, F. (2006). Red geodinámica Andalucía Oriental - Norte de África: Diseño y primeras observaciones. *Física de la Tierra*, 8:195–203. 11
- Gràcia, E., Pallas, R., Soto, J. I., Comas, M., Moreno, X., Masana, E., Santanach, P., Diez, S., Garcia, M., Dañobeitia, J., Bartolome, R., Farran, M., Gomez, M., Alpiste, M. J. R., Lastras, G., Wilmott, V., Perea, H., Blondel, P., Gomez, O., Bullock, L., Jacobs, C., Rouse, I., White, D., Whistle, S., Terrinha, P., Gafeira, J., Roque, C., y Hits, I. (2006). Active faulting offshore SE Spain (Alboran Sea): Implications for earthquake hazard assessment in the southern Iberian margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3-4):734–749. 39, 40
- Gregorius, T. (1996). *GIPSY-OASIS II. How it works?* Department of Geomatics. University of Newcastle upon Tyne. 133, 134, 177
-

- Gurtner, W. (1995). Guidelines for a permanent EUREF GPS network. *EUREF publication. EUREF Symposium Helsinki 3-6 mayo 1995*, 4:68–72. 161
- Gutscher, M. A., Dominguez, S., Westbrook, G. K., Le Roy, P., Rosas, F., Duarte, J. C., Terrinha, P., Miranda, J. M., Graindorge, D., Gailler, A., Sallares, V., y Bartolome, R. (2012). The Gibraltar subduction. a decade of new geophysical data. *Tectonophysics*, 574:72–91. 36
- Halliday, D., Resnick, R., y Walker, J. (2001). *Fundamentals of Physics*. John Wiley & Sons. 88
- Hargreaves, J. K. (1992). The solar-terrestrial environment. *Cambridge University Press*. 93
- Hatanaka, Y. (2008). A compression format and tools for GNSS observation data. *Bulletin of the Geographical Survey Institute*, 55. 176
- Hathaway, D. H., Wilson, R. M., y Reichmann, E. J. (1994). The shape of the sunspot cycle. *Solar Physics*, 151:177–190. 94
- Hefty, J. (2008). Consistency of diurnal and semidiurnal variations estimated from GPS with ocean tide loading displacements evaluated at some EPN sites. *EUREF Symposium. 18-20 june 2008, Brussels (Belgium)*. 113
- Hein, G. W., Avila-Rodríguez, J. A., y Wallner, S. (2006). The Da-Vinci Galileo Code and others. *Inside GNSS*, 6:62–73. 72
- Herring, T. A., King, R. W., y McClusky, S. C. (2010). *Introduction to GAMIT/GLOBK*. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences. Massachusetts Institute of Technology 48. 20
- Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Collins, J. (2001). *GPS Theory and Practice*. Springer-Verlag. 82, 91
- Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., y Wasle, E. (2008). GNSS Global Navigation Satellite Systems. *Springer Wien New York*. 72, 73, 75, 79, 82, 98, 101, 102, 103, 104, 108, 109
- Holdridge, D. B. (1967). An alternate expression for light time using general relativity. *Technical Report, Jet Propulsion Laboratory (JPL)*. 108
- Hollenstein, C., Müller, M. D., Geiger, A., y Kahle, H. G. (2008). Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993 – 2003. *Tectonophysics*, 449:17–40. 10
- Hopfield, H. S. (1969). Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 74(18):4487–4499. 91

- 
- Hopfield, H. S. (1972). Tropospheric range error parameters: Further studies. *The Johns Hopkins University - Applied Physics Laboratory*. 92
- Hosking, J. R. M. (1981). Fractional differencing. *Biometrika*, 68:165–176. 152
- Hugentobler, U., Dach, R., Fridez, P., y Mendl, M. (2006). *Bernese GPS software version 5.0 Draft*. Astronomical Institute University of Berne. 101, 123, 124, 133, 140, 141, 182, 212, 222
- Humphreys, T. E., Kelley, M. C., Huber, N., y Kintner, P. M. (2005). The semi-diurnal variation in GPS-derived zenith neutral delay. *Geophysical Research Letters*, 32. 112
- IERS (1989). International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Technical Note n° 3. *IERS Conventions Centre*. 111
- IERS (2010). International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Technical Note n° 36. *IERS Conventions Centre*. 51, 57, 65, 112, 113, 142, 144, 146, 151, 185
- IGN (1984). Trabajos geodésicos en el estrecho de Gibraltar. *Instituto Geográfico Nacional. Madrid*. 10
- IGSMail-0844 (1995). IGS electronic mail 0844. *Jet Propulsion Laboratory, Caltech*. 179
- IGSMail-3088 (2000). IGS electronic mail 3088. *Astronomical Institute, University of Berne*. 99
- Jakowski, N., Mayer, C., Wilken, V., y Hoque, M. M. (2008). Ionospheric impact on GNSS signal. *Física de la Tierra*, 20:11–25. 94
- Janssen, V., Commins, R., Watson, P., y McElroy, S. (2013). Using GNSS CORS to augment long-term tide gauge observations in NSW. In *Proceedings of the Surveying and Spatial Sciences Institute Conference (SSSC). April 15-19, 2013. Canberra (Australia)*. 132
- Jin, S. G., Park, P. H., y Zhu, W. Y. (2007). Microplate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(3-4):486–496. 8
- Johanson, I. A. y Burgmann, R. (2005). Creep and quakes on the northern transition zone of the San Andreas Fault from GPS and InSAR data. *Geophysical Research Letters*, 32(14). 8
- Jouanne, F., Audemard, F. A., Beck, C., Van Welden, A., Ollarves, R., y Reinoza, C. (2011). Present day deformation along the El Pilar Fault in eastern Venezuela. Evidence of creep along a major transform boundary. *Journal of Geodynamics*, 51:398–410. 9

- Jouanne, F., Mugnier, J. L., Koci, R., Bushati, S., Matev, K., Kuka, N., Shinko, I., Kociu, S., y Duni, L. (2012). GPS constraints on current tectonics of Albania. *Tectonophysics*, 554:50–62. 10
- JPL (2006). The automated GIPSY interface for the Mail-in User. *Geophysical Research Letters*. 143
- Karakhanyana, A., Vernantb, P., Doerflingerb, E., Avagyana, A., Philipb, H., Aslanyanc, R., Champollionb, C., Arakelyanc, S., Collardb, P., Baghdasaryana, H., Peyretb, M., Davtyana, V., Calais, E., y Massone, F. (2013). GPS constraints on continental deformation in the Armenian region and Lesser Caucasus. *Tectonophysics*, 592:39–45. 10
- Kedar, S., Hajj, G. A., Wilson, B. D., y Heflin, M. B. (2003). The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. *Geophysical Research Letters*, 30(16). 144
- Keller, E. A., Sanz de Galdeano, C., y Chacón, J. (1996). Tectonic geomorphology and earthquake hazard of Sierra Nevada, South Spain. In *Proceedings de la 1ª Conferencia Internacional Sierra Nevada. Granada (España)*. 10
- Khan, A. y Knudsen, P. (2011). Comparison between GIPSY-OASIS 6.0 and BERNESE 5.0 time series for long term GPS stations in Denmark. In *Proceedings of the EUREF 2011 Symposium. May 25-28, 2011. Chisinau (Moldavia)*. 212
- Khazaradze, G., Gárate, J., Suriñach, E., Martín-Dávila, J., y Asensio, E. (2006). Crustal deformation in south-eastern Betics from CuaTeNeo GPS network. In *Proceedings de la 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. 30 de enero - 3 de febrero de 2006. Sevilla (España)*. 11
- King, M. A. y Williams, S. D. P. (2009). Apparent stability of GPS monumentation from short-baseline time series. *Journal of Geophysical Research*, 114(B10403). 150
- Klobuchar, J. A. (1986). Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 23(3):325–331. 96
- Kostoglodov, V., Valenzuela, R. W., Gorvatov, A., Mimiaga, J., Franco, S. I., Alvarado, J. A., y Peláez, R. (2001). Deformation in the Guerrero seism gap, Mexico, from leveling observations. *Journal of Geodesy*, 75:19–32. 9
- Kouba, J. (2005). A possible detection of the 26 december 2004 great Sumatra-Andaman Islands earthquake with solution products of the International GNSS Service. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 49:463–483. 2, 99

- Kouba, J. (2009). A guide to using International GNSS Service IGS products. *Geodetic Survey Division. Natural Resources Canada*. 99, 104, 111, 112, 113, 123, 124, 146
- Kouba, J. y Heroux, P. (2001). Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, 5(2):12–28. 124, 128
- Kouba, J. y Springer, T. (2001). New IGS station and clock combination. *GPS Solutions*, 4(4):31–36. 101
- Koulali, A., Ouazar, D., Tahayt, A., King, R. W., Vernant, P., Reilinger, R. E., McClusky, S., Mourabit, T., Dávila, J. M., y Amraoui, N. (2011). New GPS constraints on active deformation along the Africa-Iberia plate boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 308:211–217. XIX, XIX, 22, 23, 226, 227
- Lachapelle, G., Petovello, M., Gao, Y., y Garin, L. J. (2006). Precise Point Positioning and its challenges, aided-GNSS and signal tracking. *GNSS Solutions*, pages 16–21. 123
- Lagios, E., Papadimitriou, P., Novali, F., Sakkas, V., Fumagalli, A., Vlachou, K., y Conte, S. (2012). Combined seismicity pattern analysis, DGPS and PS-InSAR studies in the broader area of Cephalonia (Greece). *Tectonophysics*, 524:43–58. 10
- Lagios, E., Sakkas, V., Novali, F., Bellotti, F., Ferretti, A., Vlachou, K., y Dietrich, V. (2013). SqueeSAR and GPS ground deformation monitoring of Santorini Volcano 1992-2012: Tectonic implications. *Tectonophysics*, 594:38–59. 10
- Langbein, J. (2004). Noise in two-color electronic distance meter measurements revisited. *Journal of Geophysical Research*, 109(B04406). 152
- Langbein, J. y Johnson, H. (1997). Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation. *Journal of Geophysical Research*, 102(B1):591–603. 150, 152
- Langley, R. (1999). The integrity of GPS. *GPS WORLD*, 10(3):60–63. 78
- Larson, K. M., Poland, M., y Miklius, A. (2010). Volcano monitoring using GPS: Developing data analysis strategies based on the June 2007 Kilauea Volcano intrusion and eruption. *Journal of Geophysical Research*, 115(B07406). 149
- Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J. P., Broca, P., y Cerri, L. (2009). Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *Journal of the Institute of Navigation*, 56(2). 129, 130, 131

- Leandro, R. (2009). *A new approach for positioning, atmospheric studies and signal analysis*. PhD thesis, Geodesy and Geomatics Engineering. University of New Brunswick. 145
- Leandro, R., Santos, M., y Langley, R. (2007). GAPS: The GPS Analysis and Positioning Software - a brief overview. In *Proceedings of the 20th International Technical meeting of the Institute of Navigation Satellite Division GNSS. September 25-28, 2007. Fort Worth (Texas)*. 145
- Leandro, R., Santos, M., y Langley, R. (2010). Analyzing GNSS data in Precise Point Positioning software. *GPS solutions*. 145
- Leandro, R. F., Langley, R. B., y Santos, M. C. (2008). UNB3m pack: A neutral atmosphere delay package for GNSS. *GPS Solutions*, 12(1):65–70. 145
- Lefevre, F., Lyard, F. H., y Provost, C. L. (2000). FES98: A new global tide finite element solution independent of altimetry. *Geophysical Research Letters*, 27(17):2717–2720. 113
- Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying*. John Wiley & Sons. 82
- Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Cox, C. M., Klosko, S. M., Luthcke, S. B., Torrence, M. H., Wang, Y. M., Williamson, R. G., Pavlis, E. C., Rapp, R. H., y Olson, T. R. (1998). The development of the joint NASA-GSFC and the national imagery and mapping agency (NIMA) geopotential model EGM96. *NASA/TP-1998. Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland*. 65
- Letellier, T. (2004). *Etude des ondes de marée sur les plateaux continentaux*. PhD thesis, Université III Paul Sabatier. 113, 146, 244
- Lidberg, M., Johansson, J. M., Scherneck, H. G., y Milne, G. A. (2010). Recent results based on continuous GPS observations of the GIA process in Fennoscandia from BIFROST. *Journal of Geodynamics*, 50:8–18. 9
- Lidberg, M. y Lilje, M. (2007). Evaluation of monument stability in the SWE-POS GNSS network using terrestrial geodetic methods up to 2003. *Reports in Geodesy and Geographical Information Systems*. 157, 160
- Liu, Z. (2011). A new automated cycle slip detection and repair method for a single dual-frequency GPS receiver. *Journal of Geodesy*, 85(3):171–183. 102
- Lukhnev, A. V., Sankov, V. A., Miroshnichenko, A. I., Ashurkov, S. V., Byzov, L. M., Sankov, A. V., Bashkuev, Y. B., Dembelov, M. G., y Calais, E. (2013). GPS-measurements of recent crustal deformation in the junction zone of the rift segments in the central Baikal rift system. *Russian Geology and Geophysics*, 54:1417–1426. 8

- 
- Lukhnev, A. V., Sankov, V. A., Miroshnichenko, A. I., Ashurkov, S. V., y Calais, E. (2010). GPS rotation and strain rates in the Baikal Mongolia region. *Russian Geology and Geophysics*, 51:785–793. 8
- Lundgren, P., Hetland, E. A., Liu, Z., y Fielding, E. J. (2009). Southern San Andreas-San Jacinto fault system slip rates estimated from earthquake cycle models constrained by GPS and interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 114(B02403). 8
- Macdonald, D. (2004). Auto-GIPSY, Graf-Net, OPUS and SCOUT: A comparison. *Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC)*. 143
- Mader, G. (1999). GPS antenna calibration at the National Geodetic Survey. *GPS Solutions*, 3(1):50–58. 104, 105
- Mahesh, P., Gahalaut, V. K., Catherine, J. K., Ambikapathy, A., Kundu, B., Bansal, A., Chadha, R. K., y Narsaiah, M. (2012). Localized crustal deformation in the Godavari failed rift, India. *Earth and Planetary Science Letters*, 333:46–51. 8
- Mahmoud, Y., Masson, F., Meghraoui, M., Cakir, Z., Alchalbi, A., Yavasoglu, H., Yonlu, O., Daoud, M., Ergintav, S., y Inan, S. (2013). Kinematic study at the junction of the East Anatolian fault and the Dead Sea fault from GPS measurements. *Journal of Geodynamics*, 67:30–39. 10
- Maillard, A. y Mauffret, A. (2013). Structure and present-day compression in the offshore area between Alicante and Ibiza Island (Eastern Iberian Margin). *Tectonophysics*, 591:116–130. 30
- Malys, S. y Slater, J. (1994). Maintenance and enhancement of the World Geodetic System 1984. In *Proceedings of the ION GPS 1994. September 20-23, 1994. Salt Lake City (Utah)*. 66
- Malys, S., Slater, J., Smith, R. W., Kunz, L. E., y Kenyon, S. C. (1997). Refinements to the World Geodetic System 1984. In *Proceedings of the 10th International Technical meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. September 16-19, 1997. Kansas City (Missouri)*. 67
- Mancilla, F. L., Stich, D., Berrocoso, M., Martín, R., Morales, J., Fernández-Ros, A., Páez, R., y Pérez-Peña, A. (2013). Delamination in the Betic Range: Deep structure, seismicity, and GPS motion. *Geology*, 41(3):307–310. XIX, 27, 28, 232
- Mao, A., Harrison, C. G. A., y Dixon, H. T. (1999). Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research*, 104(B2):2797–2818. 152
- Marini, J. W. (1972). Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. *Radio Science*, 7:223–231. 93, 145
-

- Marín-Lechado, C., Galindo-Zaldívar, J., Gil, A. J., Borque, M. J., De Lacy, M. C., Pedrera, A., López-Garrido, A. C., Alfaro, P., García-Tortosa, F., Ramos, M. I., Rodríguez-Caderot, G., Rodríguez-Fernández, J., Ruíz-Constán, A., y Sanz de Galdeano, C. (2010). Levelling profiles and a GPS network to monitor the active folding and faulting deformation in the Campo de Dalías (Betic Cordillera, Southeastern Spain). *Sensors*, 10:3504–3518. 11
- Marotta, G. S., França, G. S., Galera-Monico, J. F., Fuck, R. A., y Araújo-Filho, J. O. (2013). Strain rate of the South American lithospheric plate by SIRGAS-CON geodetic observations. *Journal of South American Earth Sciences*, 47:136–141. 9
- Marques, F. O., Catalão, J. C., DeMets, C., Costa, A. C., y Hildenbrand, A. (2013). GPS and tectonic evidence for a diffuse plate boundary at the Azores Triple Junction. *Earth and Planetary Science Letters*, 381:177–187. 9
- Martínez-Díaz, J. J. y Hernández-Enrile, J. L. (2004). Neotectonics and morphotectonics of the Southern Almeria region (Betic Cordillera-Spain) kinematic implications. *International Journal of Earth Sciences*, 93(2):189–206. 38
- Martínez-Díaz, J. J., Masana, E., y Ortuño, M. (2012). Active tectonics of the Alhama de Murcia fault, Betic Cordillera, Spain. *Journal of Iberian Geology*, 38(1):269–286. 38, 40
- Martínez-Díaz, J. J., Rigo, A., Louis, L., Capote, R., Hernández-Enrile, J. L., Carreño, E., y Tsige, M. (2002). Caracterización geológica y sismotectónica del terremoto de Mula (febrero de 1999, M4,8) mediante la utilización de datos geológicos, sismológicos y de interferometría de RADAR (InSAR). *Boletín Geológico y Minero. Revista trimestral de Ciencias de la Tierra*, 113(1). 11
- Masana, E., Pallàs, R., Perea, H., Ortuño, M., Martínez-Díaz, J. J., García-Meléndez, E., y Santanach, P. (2005). Large Holocene morphogenic earthquakes along the Albox fault, Betic Cordillera, Spain. *Journal of Geodynamics*, 40(2-3):119–133. 38
- McClusky, S., Reilinger, R., Mahmoud, S., Ben-Sari, D., y Tealeb, A. (2003). GPS constraints on Africa (Nubia and Arabia plate motions). *Geophysical Journal International*, 155(1):126–138. 11
- McNamara, I. E. (1991). *The Ionosphere: Communications Surveillance and Direction finding*. Krieger publishing company. Malabar, Florida. 93
- Melbourne, W. G. (1985). The case for ranging GPS-based geodetic systems. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. April 15-19, 1985. Rockville (Maryland)*. 102, 127, 128, 249

- Merrigan, M., Swift, E., Wong, R., y Saffel, J. (2002). A refinement to the World Geodetic System 1984 Reference Frame. In *Proceedings of the ION GPS. September 24-27, 2002. Portland (Oregon)*. 67
- Mervart, L. (1995). *Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System*. PhD thesis, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie. 107, 128
- Mervart, L., Lukes, Z., Rocken, C., y Iwabuchi, T. (2008). Precise Point Positioning with ambiguity resolution in real-time. In *Proceedings of the ION GNSS 21th International Technical Meeting of the Satellite Division. The Institute of Navigation. September 16-19, 2008. Fairfax (Virginia)*. 128
- Metheley, B. D. F. (1986). *Computational models in surveying and photogrammetry*. Blackie, Glasgow and London. 90
- Milyukov, V., Kopaev, A., Zharov, V., Mironov, A., Myasnikov, A., Kaufman, M., y Duev, D. (2010). Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS GLONASS network. *Journal of Geodynamics*, 49:216–223. 10
- Miranda, J. M., Navarro, A., Catalao, J., y Fernandes, R. M. (2012). Surface displacement field at Terceira Island deduced from repeated GPS measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 217:1–7. 9
- Mireault, Y., Tétreault, P., Lahaye, F., Héroux, P., y Kouba, J. (2008). Online Precise Point Positioning: A new, timely service from natural resources Canada. *GPS World, September 2008*, pages 59–64. 144, 145
- Misra, P. y Enge, P. (2001). *Global Positioning System, signals, measurement and performance*. Ganga-Jamuna Press. Lincoln (Massachusetts). 71, 79, 80, 100
- Mitsakaki, C., Sakellariou, M. G., y Tsinas, D. (2013). A study of the crust stress field for the Aegean region (Greece). *Tectonophysics*, 597:50–72. 10
- Müller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C., Steinberger, B., y Heine, C. (2008). Long-term sea level fluctuations driven by ocean basin dynamics. *Science*, 319:1357–1362. 187
- Moelker, D. (1997). Multiple antennas for advanced GNSS multiple mitigation and multipath direction finding. In *Proceedings of the ION GPS. September 16-19, 1997. Kansas City (Missouri)*. 110
- Mohamed, A. S., Hosny, A., Abou-Aly, N., Saleh, M., y Rayan, A. (2013). Preliminary crustal deformation model deduced from GPS and earthquakes data at Abu Dabbab area, Eastern Desert, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 2:67–76. 10

- Moreno, B. (2012). *Development of algorithms for the GNSS data processing: Their application to the modernized GPS and Galileo scenarios*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid. 73, 74, 77, 91, 97, 109, 110, 138, 142
- Moreno, X. (2011). *Neotectonic and Paleoseismic onshore-offshore integrated study of the Carboneras Fault (Eastern Betics, SE Iberia)*. PhD thesis, Universidad de Barcelona. 39
- Mousavi, Z., Walpersdorf, A., Walker, R. T., Tavakoli, F., Pathier, E., Nankali, H., Nilfouroushan, F., y Djamour, Y. (2013). Global Positioning System constraints on the active tectonics of NE Iran and the South Caspian region. *Earth and Planetary Science Letters*, 377:287–298. 8
- Mérida, M. F. (1997). La cobertura maláguide y su significado paisajístico. *Baética: Estudios de arte, geografía e historia*, 19(1):185–196. 36
- Mulic, M., Krdzalic, D., Donlagic, E., y Bilajbegovic, A. (2013). Possibilities and benefit of the online GNSS-PPP free services for GNSS applications, the accuracy and reliability. In *Proceedings of the UN/Croatia Workshop on GNSS Application. April 21-25, 2013. Baska (Croatia)*. 148
- Muller, M. D., Geiger, A., Kahle, H. G., Veis, G., Billiris, H., Paradissis, D., y Felekis, S. (2013). Velocity and deformation fields in the north Aegean domain, Greece, and implications for fault kinematics, derived from GPS data 1993-2009. *Tectonophysics*, 597:34–49. 10
- Myer, D., Sandwell, D., Brooks, B., Foster, J., y Shimada, M. (2008). Inflation along Kilauea's Southwest Rift Zone in 2006. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177:418–424. 9
- Nankali, H. R. (2006). GPS Precise Point Positioning technique: A case study in Iranian permanent GPS network for geodynamics. *GIS Development. Map Asia*. 142
- Nankali, H. R. (2011). Slip rate of the Kazerun Fault and main recent fault (Zagros, Iran) from 3D mechanical modeling. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41:89–98. 8
- Nava, B., Radicella, S. M., Leitinger, R., y Coisson, P. (2007). Use of total electron content data to analyze ionosphere electron density gradients. *Advances in Space Research*, 39:1292–1297. 96
- Nee, R. V. (1991). Multipath effects on GPS code phase measurement. In *Proceedings of the ION GPS. September 11-13, 1991. Albuquerque (New Mexico)*. 110

- 
- Niell, A. E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, 101(B2):3227–3246. 93, 142, 145, 178
- NIMA (2000). Technical Report TR8350.2, 3<sup>a</sup> edición. *Department of Defense, National Imagery and Mapping Agency*. 65
- Nocquet, J. M. (2012). Present day kinematics of the Mediterranean: A comprehensive overview of GPS results. *Tectonophysics*, 579:220–242. XIX, 24, 32, 226, 227
- Nocquet, J. M. y Calais, E. (2003). Crustal velocity field of Western Europe from permanent GPS array solutions 1996–2001. *Geophysical Journal International*, 154:72–88. 2, 11
- Nocquet, J. M. y Calais, E. (2004). Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure and Applied Geophysics*, 161(3):661–681. 11
- Norabuena, E. O., Leffler, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I. S., Ocola, L., y Ellis, M. (1998). Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the Central Andes. *Science*, 279:358–362. 9
- Nordman, M., Makinen, J., Virtanen, H., Johansson, J. M., Bilker-Koivula, M., y Virtanen, J. (2009). Crustal loading in vertical GPS time series in Fennoscandia. *Journal of Geodynamics*, 48:144–150. 9
- Nylen, T. y White, S. (2007). Online Precise Point Positioning using the Canadian Spatial Reference System (CSRS-PPP). *Natural Resources Canada*. 144
- Orozco, M. (2006). Las Alpujarras, al sur de Granada. Interpretaciones sobre su estructura e influencia de las mismas en las propuestas de evolución tectónica del extremo occidental del Cinturón Alpino Mediterráneo. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 19(1-2):113–141. 37
- Ortuño, M., Masana, E., García-Meléndez, E., Martínez-Díaz, J. J., Štěpančíková, P., Cunha, P. P., Sohbatí, R., Canora, C., Buylaert, J. P., y Murray, A. S. (2012). An exceptionally long paleoseismic record of a slow-moving fault: the Alhama de Murcia fault (Eastern Betic shear zone, Spain). *Geological Society of America Bulletin*, 124:1474–1494. 38
- Ostini, L. (2012). *Analysis and quality assessment of GNSS-derived parameter time series*. PhD thesis, Universidad de Berna (Suiza). 151
- Ozener, H., Arpat, E., Ergintav, S., Dogru, A., Cakmak, R., Turgut, B., y Dogan, U. (2010). Kinematics of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone. *Journal of Geodynamics*, 49:141–150. 10
-

- Ozener, H., Dogru, A., y Acar, M. (2013a). Determination of the displacements along the Tuzla fault (Aegean region Turkey): Preliminary results from GPS and precise leveling techniques. *Journal of Geodynamics*, 67:13–20. 10
- Ozener, H., Yilmaz, O., Dogru, A., Turgut, B., y Gurkan, O. (2013b). GPS derived velocity field of the Iznik Mekece segment of the North Anatolian Fault Zone. *Journal of Geodynamics*, 67:46–52. 10
- Palano, M., González, P. J., y Fernández, J. (2013a). Strain and stress fields along the Gibraltar Orogenic Arc: Constraints on active geodynamics. *Gondwana Research*, 23:1071–1088. XIX, XIX, 25, 26, 27, 226, 230, 231
- Palano, M., Imprescia, P., y Gresta, S. (2013b). Current stress and strain rate fields across the Dead Sea Fault System. Constraints from seismological data and GPS observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 369:305–316. 10
- Palano, M., Puglisi, G., y Gresta, S. (2008). Ground deformation patterns at Mt. Etna from 1993 to 2000 from joint use of InSAR and GPS techniques. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 169:99–120. 10
- Pedrerá, A., Ruiz-Constán, A., Galindo-Zaldívar, J., Chalouan, A., Sanz de Galdeano, C., Marín-Lechado, C., Ruano, P., Benmakhlouf, M., Akil, M., López-Garrido, A. C., Chabli, A., Ahmamou, M., y González-Castillo, L. (2011). Is there an active subduction beneath the Gibraltar orogenic arc?. Constraints from Pliocene to present-day stress field. *Journal of Geodynamics*, 52:83–96. 33
- Perlt, J., Heinert, M., y Niemeier, W. (2008). The continental margin in Iceland. A snapshot derived from combined GPS networks. *Tectonophysics*, 447:155–166. 9
- Piriz, R., Calle, D., Mozo, A., Navarro, P., Rodríguez, D., y Tobias, G. (2009). Orbits and Clocks for GLONASS Precise Point Positioning. In *Proceedings of the ION GNSS 22th International Technical Meeting of the Satellite Division of ION. September 22-25, 2009. Savannah (Georgia)*. 146
- Piriz, R., Mozo, A., Navarro, P., y Rodríguez, D. (2008). MagicGNSS: Precise GNSS products out of the box. In *Proceedings of the ION GNSS 21th International Technical Meeting of the Satellite Division of ION. September 16-19, 2008. Savannah (Georgia)*. 146, 147
- Ponraj, M., Miura, S., Reddy, C. D., Prajapati, S. K., Amirtharaj, S., y Mahajan, S. H. (2010). Estimation of strain distribution using GPS measurements in the Kumaun region of Lesser Himalaya. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39:658–667. 8

- Pradhan, R., Prajapati, S. K., Chopra, S., Kumar, A., Bansal, B. K., y Reddy, C. D. (2013). Causative source of M6,9 Sikkim Nepal border earthquake of september 2011. GPS baseline observations and strain analysis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70:179–192. 8
- Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M. A., Giner-Robles, J. L., Martínez-Díaz, J. J., Marcos-Nuez, A., Silva, P. G., Béjar, M., y Calvo, J. P. (2009). Speo-loseismology and palaeoseismicity of Benis Cve (Murcia, SE Spain): coseismic effects of the 1999 Mula Earthquake (M4,8). *The Geological Society, London*, pages 207–216. 39
- Pérez-Peña, A. (2007). *Modelización de las deformaciones corticales en el sur de España y norte de África a partir de observaciones de satélite GPS*. PhD thesis, Universidad de Cádiz. 11, 18
- Pérez-Peña, A., Martín-Davila, J., Gárate, J., Berrocoso, M., y Buforn, E. (2010). Velocity field and tectonic strain in Southern Spain and surrounding areas derived from GPS episodic measurements. *Journal of Geodynamics*, 49:232–240. XIX, XIX, 18, 19
- Radicella, S. M. y Leitinger, R. (2001). The evolution of the DGR approach to model electron density profiles. *Advances in Space Research*, 27(1):35–40. 97
- Ray, J., Altamimi, Z., Collilieux, X., y van Dam, T. (2008). Anomalous harmonics in the spectra of GPS position estimates. *GPS solutions*, 12(1):55–64. 149, 150
- Rayan, A., Fernandes, R. M., Khalil, H. A., Mahmoud, S., Miranda, J. M., y Tealab, A. (2010). Evaluation of the crustal deformations in the northern region of Lake Nasser (Egypt) derived from 8 years of GPS campaign observations. *Journal of Geodynamics*, 49:210–215. 10
- Rebischung, P., Griffiths, J., Ray, J., Schmid, R., Collilieux, X., y Garayt, B. (2012). IGS08: The IGS realization of ITRF2008. *GPS Solutions*, 16:483–494. 59
- Reilinger, R. y McClusky, S. (2011). Nubia-Arabia-Eurasia plate motions and the dynamics of Mediterranean and Middle East tectonics. *Geophysical Journal International*, 186:971–979. 8
- Reinking, J. R., Smit-Philipp, H., y Even-Tzur, G. (2011). Surface deformation along the Carmel Fault System, Israel. *Journal of Geodynamics*, 52:321–331. 10
- Riba, O. (1983). Las Islas Baleares en el marco geológico de la Cuenca Mediterránea Occidental durante el Terciario. In *Proceedings del X Congreso Nacional de Sedimentología. 26-30 de septiembre de 1983. Menorca (España)*. 42

- Roca, E. (1992). *L'Estructura de la Conca Catalano-Balear: Paper de la compressió i de la distensió en la seva gènesi*. PhD thesis, Universidad de Barcelona. 11, 42
- Rodríguez-Estrella, T., Navarro, F., Ros, M., Carrión, J., y Atenza, J. (2011). Holocene morphogenesis along a tectonically unstable coastline in the Western Mediterranean (SE Spain). *Quaternary International*, 243(1):231–248. 39
- Rodríguez-Pascua, M. A. y de Vicente, G. (2001). Estado de esfuerzos actual en la Cordillera Bética Oriental. *Boletín Geológico y Minero*, 112(4):79–95. 40, 41
- Rontogianni, S. (2010). Comparison of geodetic and seismic strain rates in Greece by using a uniform processing approach to campaign GPS measurements over the interval 1994 – 2000. *Journal of Geodynamics*, 50:381–399. 10
- Rothacher, M. (2001). Comparison of absolute and relative Antenna Phase Center variations. *GPS solutions*, 4:55–60. 104
- Ruegg, J. C., Rudloff, A., Vigny, C., Madariaga, R., de Chabalier, J. B., Campos, J., Kausel, E., Barrientos, S., y Dimitrov, D. (2009). Interseismic strain accumulation measured by GPS in the seismic gap between Constitución and Concepción in Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175:78–85. 9
- Ruíz, A. M., Ferhat, G., Alfaro, P., Sanz de Galdeano, C., de Lacy, M. C., Rodríguez-Caderot, G., y Gil, A. J. (2003). Geodetic measurements of crustal deformation on NW-SE faults of the Betic Cordillera, Southern Spain, 1999–2001. *Journal of Geodynamics*, 35(3):259–272. 11
- Ruíz, A. M., Gil, A. J., Rodríguez-Caderot, G., y de Lacy, M. C. (1999). Local geodetic control to detect ground movements in Betic Cordillera (Spain). In *Proceedings of the 9<sup>a</sup> FIG International Symposium on Deformation Measurements. September 27-30, 1999. Olsztyn (Poland)*. 11
- Saastamonien, J. (1973). Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites. *Geophysical Monograph, American Geophysical Union*, 15:247. 92
- Salgado, S., Abbondanza, S., Blondel, R., y Lannelongue, S. (2001). Constellation availability concepts for Galileo. In *Proceedings of the ION NTM. January 22-24, 2001. Long Beach (California)*. 73
- Santamaría-Gómez, A., Bouin, M. N., y Collilieux, X. (2011). Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates. *Journal of Geophysical Research*, 116(B01405). 151

- 
- Sanz de Galdeano, C. (1990). Geologic evolution of the Betic Cordilleras in the western Mediterranean, Miocene to the present. *Tectonophysics*, 172(1-2):107–119. 33, 35, 37
- Sanz de Galdeano, C. (1996). Tertiary tectonic framework of the Iberian Peninsula. *Tertiary Basins of Spain, the Stratigraphic Record of Crustal Kinematics. Cambridge University Press*, 1:9–14. 10, 39
- Sanz de Galdeano, C. (2008). The Cádiz-Alicante Fault: An important discontinuity in the Betic Cordillera. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 21(1-2):49–58. 39
- Sanz de Galdeano, C. y Vera, J. A. (1991). Una propuesta de clasificación de las cuencas neógenas béticas. *Acta Geológica Hispánica*, 26:205–227. 34, 35
- Satirapod, C., Trisirisatayawong, I., Fleitout, L., Garaud, J. D., y Simons, W. J. (2013). Vertical motions in Thailand after the 2004 Sumatra Andaman Earthquake from GPS observations and its geophysical modelling. *Advances in Space Research*, 51:1565–1571. 8
- Savage, M. K., Ohminato, T., Aoki, Y., Tsuji, H., y Greve, S. M. (2010). Stress magnitude and its temporal variation at Mt. Asama Volcano, Japan, from seismic anisotropy and GPS. *Earth and Planetary Science Letters*, 290:403–414. 8
- Sàbat, F., Gelabert, B., Rodríguez-Perez, A., y Giménez, J. (2011). Geological structure and evolution of Majorca: Implications for the origin of the Western Mediterranean. *Tectonophysics*, 510:217–238. 46
- Schaer, S. (1997). How to use CODE's global ionosphere maps. *University of Berne*. 96
- Schaer, S. (2000). Monitoring P1C1 code biases. *IGSMail n° 2827, IGS Central Bureau Information System*. 108
- Schaer, S., Gurnter, W., y Feltens, J. (1998). IONEX: The IONosphere Map Exchange Format Version 1. In *Proceedings of the IGS AC workshop. February 9-11, 1998. Darmstadt (Germany)*. 145
- Schettino, A. y Scotese, C. R. (2005). Apparent polar wander paths for the major continents (200 Ma. to the present day): A palaeomagnetic reference frame for global plate tectonic reconstructions. *Geophysical Journal International*, 163:727–759. 187
- Schmid, R. (2011). Upcoming switch to IGS08/igs08.atx - details on igs08.atx. *IGS Mail n° 6355, IGS Central Bureau Information System*. 106
-

- Schmid, R. y Rothacher, M. (2003). Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites. *Journal of Geodesy*, 77(7-8):440–446. 106
- Seeber, G. (2003). *Satellite Geodesy*. De Gruyter, Berlín. 2, 49, 50, 66, 70, 78, 79, 81, 92, 98, 100, 103, 109, 115, 119, 126
- Sella, G., Dixo, T. H., y Mao, A. (2002). REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *Journal of Geophysical Research*, 107(B4):2081. 149
- Sella, G., Stein, S., Dixon, T. H., Craymer, M., James, T. S., Mazzoti, S., y Dokka, R. K. (2007). Observation of glacial isostatic adjustment in stable North America with GPS. *Geophysical Research Letters*, 34(L02306). 149
- Serpelloni, E., Burgmann, R., Anzidei, M., Baldi, P., Mastrolembo-Ventura, B., y Boschi, E. (2010). Strain accumulation across the Messina Straits and kinematics of Sicily and Calabria from GPS data and dislocation modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, 298:347–360. 10
- Serpelloni, E., Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M., Baldi, P., y Gasperini, P. (2007). Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophysical Journal International*, 169:1180–1200. XIX, 15, 16, 30, 32
- Seton, M., Müller, R. D., Zahirovic, S., Gaina, C., Torsvik, T., Shephard, G., Talsma, A., Gurnis, M., Turner, M., Maus, S., y Chandler, M. (2012). Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. *Earth Science Reviews*, 13:212–270. 186
- Sevilla, M. J. y Martín, M. D. (1986). Diseño de una microrred en la caldera del Teide para el estudio de deformaciones de la corteza en la zona. *Instituto de Astronomía y Geodesia. Madrid*, 186. 9
- Sevilla, M. J., Soler, E. G., y Sánchez, F. J. (1996). Observación, análisis de datos y compensación de la sexta campaña de distanciometría en la caldera del Teide. *Topografía y Cartografía*, 72:2–15. 9
- Shen, Z. K., Jackson, D. D., y Ge, B. X. (1996). Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements. *Journal of Geophysical Research*, 101(B12):957–980. 8
- Shestakov, N. V., Takahashi, H., Ohzono, M., Prytkov, A. S., Bykov, V. G., Gerasimenko, M. D., Luneva, M. N., Gerasimov, G. N., Kolomiets, A. G., Bormotov, V. A., Vasilenko, N. F., Baek, J., Park, P. H., y Serov, M. A. (2012). Analysis of the far-field crustal displacements caused by the 2011 Great Tohoku earthquake inferred from continuous GPS observations. *Tectonophysics*, 524:76–86. 8

- 
- Shirzaei, M., Bürgmann, R., Foster, J., Walter, T. R., y Brooks, B. A. (2013). Aseismic deformation across the Hilina fault system, Hawaii, revealed by wavelet analysis of InSAR and GPS time series. *Earth and Planetary Science Letters*, 376:12–19. 9
- Silva, P. G., González-Hernández, F. M., Giménez, J., Santos, G., Carrasco, P., De Luque, L., Delgado, M., Goy, J. L., y Zazo, C. (2004). Fault-trenching analysis of the Sencelles fault (Mallorca Island, Spain). *32nd International Geological Congress*. 11
- Silva, P. G., Goy, J. L., Somoza, L., Zazo, C., y Bardaji, T. (1993). Landscape response to strike-slip faulting linked to collisional settings; quaternary tectonics and basin formation in the eastern Betics, southeastern Spain. *Tectonophysics*, 224(4):289–303. 37, 38
- Smith, K. D., von Seggern, D., Blewitt, G., Preston, L., Anderson, J. G., Wernicke, B. P., y Davis, J. L. (2004). Evidence for deep magma injection beneath Lake Tahoe, Nevada-California. *Science*, 305(5688):1277–1280. 2
- Som, S. K., Choudhuri, A. R., Shivgotra, V., Basir, S. R., Saha, A. K., y Swamy, M. M. (2011). Transtension to transpression. A study of strain evolution in Andaman Islands based on GPS measurements following Great Sumatra Andaman Earthquake, 2004. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42:38–50. 8
- Soria, J. M., Estevez, A., y Rodríguez-Pérez, M. (1993). Materiales afines al Complejo del Campo de Gibraltar en el sector oeste del Mencil (Subbético medio, tercio central de la Cordillera Bética). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 6:105–112. 36
- Sousa, J. J., Ruiz, A. M., Hanssen, R. F., Bastos, L., Gil, A. J., Galindo-Zaldívar, J., y Sanz de Galdeano, C. (2010). PS-InSAR processing methodologies in the detection of field surface deformation study of the Granada basin (Central Betic Cordilleras, southern Spain). *Journal of Geodynamics*, 49(3-4):181–189. 11
- Stadler, G., Gurnis, M., Burstedde, C., Wilcox, L., Alisic, L., y Ghattas, O. (2010). The dynamics of plate tectonics and mantle flow: From local to global scales. *Science*, 329:1033. 187
- Stich, D., Serpelloni, E., Mancilla, F. L., y Morales, J. (2006). Kinematics of the Iberia-Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations. *Tectonophysics*, 426:295–317. XIX, 13, 14, 227
- Stiros, S., Moschas, F., Feng, L., y Newman, A. (2013). Long-term versus short-term deformation of the meizoseismal area of the 2008 Achaia-Elia (M6,4) earthquake in NW Peloponnese, Greece: Evidence from historical triangulation and morphotectonic data. *Tectonophysics*, 592:150–158. 10
-

- Su, C. C. (2001). Reinterpretation of the Michelson-Morley experiment based on the GPS Sagnac Correction. *Europhysics Letters*, 56(2):170–174. 108
- Tahayt, A., Feigl, K. L., Mourabit, T., Rigo, A., Reilinger, R., McClusky, S., Fadil, A., Berthier, E., Dorbath, L., Serroukh, M., Gomez, F., y Ben-Sari, D. (2009). The Al Hoceima (Morocco) earthquake of 24 february 2004, analysis and interpretation of data from ENVISAT, ASAR and SPOT5 validated by ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 113:306–316. 11
- Tahayt, A., Mourabit, T., Rigo, A., Feigl, K. L., Fadil, A., McClusky, S., Reilinger, R., Serroukh, M., Ouazzani-Touhami, A., Ben-Sari, D., y Vernant, P. (2008). Mouvements actuels des blocs tectoniques dans l’arc Bético-Rifain à partir des mesures GPS entre 1999 et 2005. *Comptes Rendus Geoscience*, 340:400–413. 18
- Talaya, J., Feigl, K., Térrens, A., y Colomina, I. (1999). Practical lessons from analysis of a GPS network designed to detect movements of 1mm/year in the Eastern Pyrenees. *Physics and Chemistry of the Earth*, 24(4):355–359. 10
- Tatar, O., Poyraz, F., GURSOY, H., Cakir, Z., Ergintav, S., Akpınar, Z., Koçbulut, F., Sezen, F., Turk, T., Hastaoglu, K. O., Polat, A., Levent-Mesci, B., GURSOY, O., Ercument-Ayazli, I., Çakmak, R., Belgen, A., y Yavasoglu, H. (2012). Crustal deformation and kinematics of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) from GPS measurements. *Tectonophysics*, 518:55–62. 10
- Teferle, F. N., Orliac, E. J., y Bingley, R. M. (2007). An assessment of Bernese GPS software Precise Point Positioning using IGS final products for global site velocities. *GPS Solutions*, 11:205–213. 2, 169, 190, 201, 212
- Tesauro, M., Hollenstein, C., Egli, R., Geiger, A., y Kahle, H. G. (2006). Analysis of central western Europe deformation using GPS and seismic data. *Journal of Geodynamics*, 42:194–209. 9
- Teunissen, P. J. G. y Verhagen, S. (2008). GNSS carrier phase ambiguity resolution: challenges and open problems. *International Association of Geodesy Symposia*, 133:785–792. 129
- Teza, G., Pesci, A., y Galgaro, A. (2008). Grid-strain and Grid-strain3: Software packages for strain field computation in 2D and 3D environments. *Computers and Geosciences*, 34:1142–1153. 190, 217
- Timofeev, V. Y., Ardyukov, D. G., Solovev, V. M., Shibaev, S. V., Petrov, A. F., Gornov, P. Y., Shestakov, N. V., Boiko, E. V., y Timofeev, A. V. (2012). Plate boundaries in the Far East region of Russia (from GPS measurement, seismic-prospecting, and seismological data). *Russian Geology and Geophysics*, 53:376–391. 8

- 
- Tong, X., Sandwell, D. T., y Smith-Konter, B. (2012). High resolution interseismic velocity data along the San Andreas Fault from GPS and InSAR. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118:1–21. 8
- Tran, D. T., Nguyen, T. Y., Duong, C. C., Vy, Q. H., Zuchiewicz, W., Nguyen, Q. C., y Nguyen, V. N. (2013). Recent crustal movements of northern Vietnam from GPS data. *Journal of Geodynamics*, 69:5–10. 8
- Térmens, A., Castellote, M., Soro, M., Fleta, J., Goula, X., y Talaya, J. (2000). PotSis'92, potSis'94 and potSis'99 campaigns to improve the knowledge of seismic potentiality in the Eastern Pyrenees. *WEGENER X General Assembly, San Fernando (España)*. 10
- Tsai, M. C., Yu, S. B., Hsu, Y. J., Chen, H. Y., y Chen, H. W. (2012). Interseismic crustal deformation of frontal thrust fault system in the Chiayi Tainan area, Taiwan. *Tectonophysics*, 554:169–184. 8
- Van-Haaften, J. (2007). Five satellites in geostationary orbit China's Beidou Navigation Project. *GEOInformatics*. 76
- Van Melle, M. (1990). Cesium and rubidium standards and performance on the GPS program. In *Proceedings of the ION GPS 1990. September 19-21, 1990. Colorado Springs (Colorado)*. 78
- Van Melle, M. (2008). Real time zero-difference ambiguities fixing and absolute RTK. In *Proceedings of the ION GPS. January 28-30, 2008. San Diego (California)*. 127, 129
- Vanicek, P. y Krakiwsky, E. (1992). *Geodesy. The concepts*. Elsevier. 1
- Vera, J. A., Gallegos, J. A., y Roca, A. (1984). *Geología*. Edelvives. 34, 36, 37
- Vergés, J. y Fernández, M. (2012). Tethys-Atlantic interaction along the Iberia-Africa plate boundary: The Betic-Rif orogenic system. *Tectonophysics*, 579:144–172. 33
- Verma, M. y Bansal, B. K. (2012). Indian National GNSS Programme: Crustal deformation measurements in the Indian Sub-continent. *Journal of Asian Earth Sciences*, 50:1–6. 8
- Vernant, P., Fadil, A., Mourabit, T., Ouazar, D., Koulali, A., Dávila, J. M., Gárate, J., McClusky, S., y Reilinger, R. (2010). Geodetic constraints on active tectonics of the Western Mediterranean: Implications for the kinematics and dynamics of the Nubia-Eurasia plate boundary zone. *Journal of Geodynamics*, 49:123–129. XIX, XIX, 20, 21, 22, 232
-

- Vieira, R., Sevilla, M. J., Camacho, A. G., y Martín, M. D. (1986). Geodesia de precisión aplicada al control de movimientos y deformaciones de la caldera del Teide. *Instituto de Astronomía y Geodesia. Madrid*, 145. 9
- Vigny, C., Rudloff, A., Ruegg, J. C., Madariaga, R., Campos, J., y Alvarez, M. (2009). Upper plate deformation measured by GPS in the Coquimbo Gap, Chile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175:86–95. 9
- Viti, M., Mantovani, E., Babbucci, D., y Tamburelli, C. (2011). Plate kinematics and geodynamics in the Central Mediterranean. *Journal of Geodynamics*, 51:190–204. 10
- Wahr, J. M. (1981). The forced nutation of an elliptical, rotating, elastic, and ocean less Earth. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 64:705–727. 111
- Wahr, J. M. (1985). Deformation induced by Polar Motion. *Journal of Geophysical Research*, 90(B11):9363–9368. 178
- Wang, J., Ye, Z. R., y He, J. K. (2008). Three dimensional mechanical modeling of large scale crustal deformation in China constrained by the GPS velocity field. *Tectonophysics*, 446:51–60. 8
- Wang, L. y Hu, W. S. (2013). Study and application in road survey on CORS technique. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96:1707–1711. 8
- Wübbena, G. (1985). Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements. In *Proceedings of the 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. April 15-19, 1985. Rockville (Maryland)*. 102, 127, 128, 249
- Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Boder, V., y Seeber, G. (2000). Automated absolute field calibration of GPS antennas. In *Proceedings of the ION GPS. September 19-22, 2000. Salt Lake City (Utah)*. 106
- Weber, J. C., Saleh, J., Balkaransingh, S., Dixon, T., Ambeh, W., Leong, T., Rodriguez, A., y Miller, K. (2011). Triangulation-toGPS and GPS-to-GPS geodesy in Trinidad, West Indies. Neotectonics, seismic risk, and geologic implications. *Marine and Petroleum Geology*, 28:200–211. 9
- Williams, S. D. P. (2008). CATS:GPS coordinate time series analysis software. *GPS Solutions*, 12:147–153. 150, 152, 153, 189, 242, 249
- Williams, S. P. D., Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R. M., Prawirodirdjo, L., Miller, M., y Johnson, D. J. (2004). Error analysis of continuous GPS position time-series. *Journal of Geophysical Research*, 109(B03412). 149, 150, 152

- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, W., y Lichten, S. (1993). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase measurements. *Manuscripta Geodetica*, 18:91–98. 106, 143, 145, 148
- Yong, W., Yanping, L., y Youpo, S. (2011). The study of Japan earthquake deformation based on GPS. *Procedia Environmental Sciences*, 10:9–13. 8
- Yoshioka, S. y Matsuoka, Y. (2013). Interplate coupling along the Nankai Trough, southwest Japan, inferred from inversion analyses of GPS data. Effects of subducting plate geometry and spacing of hypothetical ocean-bottom GPS stations. *Tectonophysics*, 600:165–174. 8
- Yu, S. B., Hsu, Y. J., Bacolcol, T., Yang, C. C., Tsai, Y. C., y Solidum, R. (2013). Present day crustal deformation along the Philippine Fault in Luzon, Philippines. *Journal of Asian Earth Sciences*, 65:64–74. 8
- Zeimetz, P. y Kuhlmann, H. (2008). On the accuracy of absolute GNSS antenna calibration and the conception of a new anechoic chamber. In *Proceedings of the FIG working week. June 14-19, 2008. Stockholm (Sweden)*. 105
- Zeng, Y. y Shen, Z. K. (2013). Fault network modeling of crustal deformation in California constrained using GPS and geologic observations. *Tectonophysics*, 612:1–17. 8
- Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Williams, S., Genrich, J., Wdowingski, S., y Behr, J. (1997). Southern California permanent GPS geodetic array. *Journal of Geophysical Research*, 102(B8):18035–18055. 152
- Zhang, X. y Li, P. (2013). Partial ambiguity resolution method for Precise Point Positioning. In *GNSS PPP Workshop: Reaching Full Potential. June 12-14, 2013. Ottawa (Canada)*. 128
- Zheng, W. J., Zhang, P. Z., He, W. G., Yuan, D. Y., Shao, Y. X., Zheng, D. W., Ge, W. P., y Min, W. (2013). Transformation of displacement between strike-slip and crustal shortening in the northern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from decadal GPS measurements and late Quaternary slip rates on faults. *Tectonophysics*, 584:267–280. 8
- Zhu, S. y Shi, Y. (2011). Estimation of GPS strain rate and its error analysis in the Chinese continent. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40:351–362. 8
- Zhu, S. Y. y Groten, E. (1988). Relativistic effects in GPS. *Lecture notes in Earth Sciences*, 19:41–46. 108
- Zitellini, N., Gràcia, E., Matias, L., Terrinha, P., Abreu, M. A., DeAlteriis, G., Henriët, J. P., Dañobeitia, J. J., Masson, D. G., Mulder, T., Ramella, R., Somoza, L., y Diez, S. (2009). The quest for the Africa-Eurasia plate boundary west of the Strait of Gibraltar. *Earth and Planetary Science Letters*. 9

- Zumberge, J. F. y Gendt, G. (2001). The demise of selective availability and implications for the International GPS Service. *Physics and Chemistry of the Earth Part A-solid Earth and Geodesy*, 6-8:637–644. 70, 71, 101
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., y Webb, F. H. (1997a). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, 102:5005–5017. 2, 123, 124, 126, 131, 133
- Zumberge, J. F., Watkins, M. M., y Webb, F. H. (1997b). Characteristics and application of precise GPS clock solutions every 30 seconds. *Navigation: Journal of the Institution of Navigation*, 44(4):449–456. 130