



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Título

**CONTROL DE MOVIMIENTOS DE LADERA EN EL
PIRINEO ORIENTAL CON TÉCNICAS AVANZADAS**

Autor/a

Adrià PÉREZ CARRERAS

Tutor/a

Josep A. GILI y Michele CROSETTO

Departamento

Enginyeria del Terreny y Institut de Geomàtica

Intensificació

E.T.O.P. – Construccions Civils

Fecha

Julio de 2011



Escola Tècnica Superior d'Enginyers
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Título

**CONTROL DE MOVIMENTS DE VESSANT DEL PIRINEU
ORIENTAL AMB TÈCNIQUES AVANÇADES**

Autor/a

Adrià PÉREZ CARRERAS

Tutor/a

Josep A. GILI y Michele CROSETTO

Departamento

Enginyeria del Terreny y Institut de Geomàtica

Intensificación

E.T.O.P. – Construccions Civils

Fecha

Julio de 2011

Resumen

Título: “Control de movimientos de ladera en el Pirineo Oriental con técnicas avanzadas”

Autor: Adrià Pérez Carreras

Tutores: Josep A. Gili y Michele Crosetto

El presente trabajo se centra en el estudio de desplazamientos superficiales de laderas inestables a partir de técnicas de monitorización diversas, estudiando el caso particular de una ladera localizada en los Pirineos Orientales y monitorizada desde los años 1980 por la Universidad Politécnica de Catalunya (ladera de Vallcebre, Comarca de Berguedà).

En Ingeniería Civil en general y en el estudio de riesgos geológicos, en particular el seguimiento del comportamiento del terreno es fundamental tanto para establecer las causas del fenómeno base como para controlar la evolución del riesgo. En muchos escenarios, la medida primera y más efectiva consiste en la determinación de las deformaciones de los materiales presentes a lo largo del tiempo.

Para ello una gran variedad de técnicas de monitorización de movimientos y deslizamientos en laderas inestables han sido desarrolladas, siendo la ladera de Vallcebre un escenario empleado como *laboratorio natural* en las últimas tres décadas, con el objetivo de validar nuevas técnicas de monitorización.

Es conocido que en los últimos años se ha mejorado el uso de técnicas de teledetección activa (T.A.) para la observación del territorio, especialmente usando técnicas Radar (microondas). La interferometría Radar desde satélite (InSAR) ha permitido obtener modelos digitales del terreno (MDT) mejorados, y también realizar un seguimiento de los cambios o movimientos del terreno (DInSAR).

En estos momentos está en etapa de desarrollo y validación el uso de técnicas Radar desde el suelo (GB-SAR). Las medias que se obtienen con los pocos equipos disponibles se han de corregir, estudiar y comparar con los movimientos detectados por otras técnicas ‘clásicas’ para validar los resultados y demostrar las posibilidades y/o limitaciones. El trabajo que se presenta se enmarca en este campo de comprobación y verificación, dentro del marco del proyecto europeo SAFELAND del 7FP (*Seventh Framework Programme for research and technological development*) que está actualmente desarrollándose con participación de la UPC y del *Institut de Geomàtica* (entre otros 25 partners europeos).

Por ello y por su novedad, el trabajo se centra en la medida de desplazamientos mediante técnicas Radar interferométricas desde el suelo (GB-SAR), así como la problemática en su uso debido a diversos factores que se estudian a lo largo del trabajo. Para ello se emplea como escenario de validación la ladera de Vallcebre, dado que conocemos bien su comportamiento y además está monitorizada con otras técnicas que pueden servir para validar los resultados obtenidos con GB-SAR, objeto principal de estudio de este trabajo.

Así, en este TFC se estudian en primer lugar las características geológicas, geométricas, geotécnicas e hidrogeológicas de la ladera de Vallcebre. Asimismo se estudian detalladamente las diferentes técnicas empleadas actualmente: topografía clásica, GB-SAR (técnicas Radar terrestres), GPS diferencial de precisión, extensometría de cable y piezometría. También se detalla el tratamiento de los datos obtenidos por cada sistema para la obtención de desplazamientos y la solución de los posibles problemas que surgen en este proceso, especialmente en el caso de GB-SAR, donde los datos tomados se ven fuertemente afectados por artefactos atmosféricos que es necesario estimar mediante modelos para poder obtener soluciones fiables.

Abstract

Title: “Monitoring of slopes in the eastern Pyrenees using advanced techniques”

Author: Adrià Pérez Carreras

Tutors: Josep A. Gili & Michele Crosetto

This thesis focuses on the study of slopes displacements using different monitoring techniques, studying the particular case of a landslide located in the Eastern Pyrenees and monitored from the 80's for the Polytechnic University of Catalonia (slope of Vallcebre , Berguedà).

In the study of geological hazards, monitoring the behavior of the land is fundamental to control the evolution of risk to establish the root causes base. In many scenarios, the first and most effective measure is to determine the deformations of the materials present over time.

To this end a variety of monitoring techniques has been developed, and the landslide of Vallcebre has been used as a natural laboratory for the past three decades, in order to test new monitoring techniques.

This thesis studies a priori the geologic, geometric, geotechnical and hydrogeological features of the landslide that is being studied. It also examines in detail the different monitoring techniques used today to measure movements in the landslide that is case of study: classic surveying, GB-SAR (ground radar techniques), differential GPS, wire extensometer cable and piezometry, as well as the processing of data collected by each system to obtain displacements and solution potential problems that arise in this process, especially in the case of GB-SAR, where data taken are strongly affected by atmospheric artifacts that must be estimated using models to obtain reliable solutions.

It is known that in recent years has improved the use of active remote sensing techniques for the observation of the territory, especially using Radar techniques (microwaves). The satellite radar interferometry (InSAR) has led to improve on the digital elevation models (DEM), and also track changes or movements of the ground (DInSAR).

Right now is under development and validation using Radar techniques from the ground (GB-SAR). Data obtained with the few available GB-SAR sensors must be corrected, studied and compared with the movements detected by other ‘classic’ techniques to validate the results and demonstrate the possibilities and / or limitations of GB-SAR techniques. This thesis is designed to test and verify the used technique within the framework of a European project 7FP (Seventh Framework Programme for Research and Technological Development) that is currently being developed with participation of the Polytechnic University of Catalonia and the Institute of Geomatics.

For that reason and because of its novelty, the work focuses on the extent of displacement using Radar interferometric techniques from the ground (GB-SAR) and the problems in their use due to various factors which are discussed throughout the thesis. The slope used like a validation scenario is the Vallcebre landslide, due to we know well their behavior, and is also monitored by other techniques that can serve to validate the results obtained with GB-SAR, the main object of study in this work.

Agradecimientos

Se agradece el marco de trabajo proporcionado por el proyecto europeo SAFELAND (7thFP), a su investigador principal, Jordi Corominas, y a todos sus participantes (UPC i *Institut de Geomàtica*), que han contribuido a la toma de datos desarrollada en Vallcebre.

A Michele Crosetto por la co-tutorización de este trabajo y por haberme permitido trabajar con su equipo en la Unidad de Teledetección Activa del *Institut de Geomàtica*, concretamente junto a Oriol Montserrat y Guido Luzi, una aportación tan rigurosa como a la vez indispensable para la consecución de este trabajo.

A Oriol Montserrat, matemático de la Unidad de Teledetección Activa, por las horas de dedicación en la tutorización y revisión de este trabajo y por las lecciones y consejos dados a lo largo de estos meses. Desde luego su colaboración ha sido importantísima de cara a la realización de este trabajo.

Un placer asimismo haber podido trabajar con Guido Luzi, uno de los pioneros en el desarrollo de sistemas Radar terrestres (GB-SAR). Sus lecciones sobre la física de los sistemas Radar han sido indispensables para comprender y poder adentrarme en el mundo de las microondas aplicadas a la medida de deformaciones. Por todo ello y por la dedicación en la tutorización y revisión de este trabajo, *grazie mille*.

A todas las personas del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, *Institut de Geomàtica* y Departamento de Teoría del Señal y Comunicaciones de la UPC, que de un modo u otro han podido contribuir en mayor o menor medida en la consecución de este trabajo.

Y finalmente a Josep Gili, catedrático del Departamento de Ingeniería del Terreno y tutor de este trabajo, por su enorme dedicación, atención, consejo y vocación que ha demostrado no únicamente a lo largo de estos meses, sino en los más de tres años de trabajo junto a él en el Departamento de Ingeniería del Terreno.

El Vendrell, junio de 2011

ÍNDICE RESUMIDO

I. INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y CONTENIDO	5
II. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MONITORIZACIÓN EMPLEADOS	28
III. PROCESADO DE LAS OBSERVACIONES Y RESULTADOS	76
IV. CONCLUSIONES FINALES	115
Referencias	124

ÍNDICE DETALLADO

I. INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y CONTENIDO	5
1. Objeto del Trabajo. Contexto y Problemática	5
2. Situación de Vallcebre	9
3. Geometría de la ladera de Vallcebre	11
4. Contexto Geomecánico	18
4.1. Contexto Geológico	18
4.2. Contexto Geotécnico	25
4.3. Hidrogeología	26
II. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MONITORIZACIÓN EMPLEADOS	28
1. EXTENSÓMETROS DE CABLE	28
1.1. INTRODUCCIÓN	28

1.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	28
1.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	30
2. PIEZÓMETROS	32
2.1. PIEZÓMETROS DE CUERDA VIBRANTE. FUNCIONAMIENTO	32
2.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	32
3. RADAR DE APERTURA SINTÉTICA TERRESTRE (GB-SAR)	35
3.1. FUNDAMENTOS DE GB-SAR	35
3.1.1. Fundamentos del Radar	36
3.1.2. Apertura Sintética	37
3.1.3. Adquisición de imágenes con GB-SAR	38
3.1.2.1. Características de la medida	40
3.2. INTERFEROMETRÍA SAR (InSAR)	42
3.2.1. Selección de píxeles. Concepto de Coherencia	44
3.2.1.1. Empleo de <i>Corner Reflectors</i>	46
3.3. APLICACIONES DEL GB-SAR	48
3.4. COMPENDIO FOTOGRÁFICO	49
4. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATÉLITE (GNSS)	52
4.1. INTRODUCCIÓN	52
4.2. ARQUITECTURA DE LOS SISTEMAS GNSS Y FUENTES DE ERROR	53
4.3. COMPARATIVA ENTRE GPS-NAVSTAR Y GLONASS	56
4.3.1. Características orbitales	56
4.3.2. Sistema de referencia o datum	56
4.3.3. Base de tiempo	56
4.3.4. Señales emitidas	57
4.3.5. Códigos modulados	58
4.4. SOLUCIONES DE CÓDIGO (GPS ABSOLUTO)	59
4.5. SOLUCIONES DE FASE (GPS DIFERENCIAL DE PRECISIÓN)	60
4.6. TÉCNICAS DE OBSERVACIÓN CON GPS DIFERENCIAL. CONCLUSIONES ...	62
4.6.1. OBSERVACIONES EN ESTÁTICO	62
4.6.2. OBSERVACIONES EN RTK	65
4.6.3. CONCLUSIONES	68

5. TOPOGRAFÍA CLÁSICA	69
5.1. INTRODUCCIÓN	69
5.2. APLICACIÓN: CALIBRACIÓN EN GB-SAR	69
6. COMPARATIVA ENTRE TÉCNICAS. CONCLUSIONES	73
6.1. INTRODUCCIÓN	73
6.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES	73
6.3. CONCLUSIONES	75
III. PROCESADO DE LAS OBSERVACIONES RADAR Y RESULTADOS ..	76
1. INTRODUCCIÓN. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS MEDIDOS	76
2. EFECTOS DE LA ATMÓSFERA SOBRE LA FASE	80
3. DATOS BRUTOS OBSERVADOS EN CAMPO	81
4. OBSERVACIONES GB-SAR EN CONTINUO: APLICACIÓN DE UN MODELO ATMOSFÉRICO A PARTIR DE DATOS METEOROLÓGICOS MEDIDOS	89
4.1. OBTENCIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS APARENTES CON LA <i>METEO DATA</i> ..	89
4.2. COMPARACIÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTOS MEDIDOS CON GB-SAR Y LOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MODELO ATMOSFÉRICO APLICADO	92
4.3. CONCLUSIONES	96
5. OBTENCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN OBSERVACIONES GB-SAR EN CONTINUO. CARACTERIZACIÓN DE LA ATMÓSFERA AJUSTANDO FUNCIONES LINEALES Y CUADRÁTICAS	99
5.1. AJUSTE DE UN MODELO A PARTIR DE PUNTOS FIJOS SOBRE LA LADERA	99
5.1.1. Estudio de puntos fijos sobre la ladera	99
5.1.2. Test del distanciómetro de la estación total	103
5.1.3. Caracterización atmosférica mediante modelos lineales y cuadráticos	105
5.1.4. Conclusiones	107

5.2. RESULTADOS OBTENIDOS. PUNTOS ESTABLES	108
5.3. RESULTADOS OBTENIDOS. ZONA NO ESTABLE	110
5.4. CONCLUSIONES	113
IV. CONCLUSIONES FINALES	115
Referencias	124

I. INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS Y CONTENIDO.

1. Objeto del Trabajo. Contexto y Problemática.

El presente trabajo se centra en el estudio de desplazamientos superficiales de laderas inestables a partir de técnicas de monitorización diversas, estudiando el caso particular de una ladera localizada en los pirineos orientales y monitorizada desde 1980 por la Universidad Politécnica de Catalunya.

En el estudio de riesgos geológicos, el seguimiento del comportamiento del terreno es fundamental tanto para controlar la evolución del riesgo como para establecer las causas del fenómeno base. En muchos escenarios, la medida primera y más efectiva consiste en la determinación de las deformaciones de los materiales presentes a lo largo del tiempo. Para ello, una gran variedad de técnicas de monitorización de movimientos y deslizamientos en laderas inestables han sido desarrolladas, dado que la medida de desplazamientos superficiales es habitualmente la vía más simple para estudiar la evolución de una ladera y analizar las características de su movimiento.

Es decir, medir los desplazamientos que se están produciendo es útil para poder establecer relaciones causa-efecto entre el movimiento y las causas que originan el mismo, para finalmente poder elaborar modelos geomecánicos de comportamiento de la ladera y métodos de predicción de riesgos.

La toma continua de datos de pluviometría, presiones de agua y desplazamientos son datos indispensables para analizar la estabilidad de la ladera y poder comprender la dinámica del proceso de deslizamiento de la misma, dado que el agua subterránea es el principal agente desencadenante del deslizamiento: existe una fuerte relación entre el movimiento de la ladera y la presencia de agua en el subsuelo, tendiendo a producirse aceleraciones del movimiento en periodos lluviosos [1]. Existe por tanto una fuerte correlación entre la reactivación de movimientos y el aumento de presiones en el subsuelo de la ladera.

Por ello, cuando combinamos los datos del cable extensométrico (apartado II.1) con piezómetros (apartado II.2) tenemos una gran capacidad para reproducir la respuesta de la ladera a la lluvia y a las fluctuaciones de agua subterránea con un elevado grado de precisión. Ello incluye los períodos en los que se producen desplazamientos importantes durante acontecimientos lluviosos críticos.

En el término municipal de Vallcebre (Berguedà, Barcelona) se encuentra localizada una ladera inestable de tierras de tipo traslacional que se mantiene activa desde hace, probablemente, siglos. El deslizamiento de la ladera se produce cuando la masa de terreno inestable (suelos) desliza respecto de una zona estable (manto rocoso) a partir de una o varias superficies de rotura.

La ladera se sitúa en una zona rural, agrícola y boscosa, con una serie de edificaciones diseminadas sobre la plataforma de deslizamiento de la misma. Los propios habitantes de la zona son los que experimentan el movimiento de la ladera, identificando afectaciones en las edificaciones, como grietas y desalineamientos de muros y paredes de carga.

Por ello, desde 1980 la Universidad Politécnica de Catalunya realiza estudios sobre dicha ladera para determinar las causas del movimiento, contrastar diferentes técnicas de monitorización y desarrollar finalmente un modelo geomecánico que describa su comportamiento. Es por ello un escenario empleado como **laboratorio natural**.

En la ladera de Vallcebre se han empleado métodos que trabajan desde el exterior de la ladera inestable (técnicas GPS, topografía clásica, fotogrametría e interferometría radar), obteniendo desplazamientos de puntos en la superficie. Adicionalmente, existen otras técnicas que realizan determinaciones mediante sensores introducidos a lo largo de sondeos perforados en el terreno (extensómetros de cable, inclinómetros y piezómetros). No obstante, es conveniente usar más de una técnica de monitorización de forma independiente para poder complementar y contrastar los resultados obtenidos. Los condicionantes de emplazamiento, de tiempo, técnicos y económicos son los que van a dictar qué técnica o técnicas van a ser empleadas en cada caso concreto.

La monitorización de la ladera se inició en 1987 mediante topografía clásica y fotogrametría [2]. En 1996, el emplazamiento fue incluido en el marco del proyecto NEWTECH, financiado por la Comisión Europea. El propósito del proyecto fue el de aplicar y mejorar nuevas técnicas y equipos para la monitorización y el modelado del comportamiento de laderas inestables. Entre julio de 1996 y marzo de 1997 se perforaron 14 sondeos en la ladera y fueron equipados con extensómetros de cable y piezómetros [3]. Desde entonces los desplazamientos y las presiones intersticiales son medidos de forma ininterrumpida mediante dichos equipos. Posteriormente se han aplicado técnicas más modernas de monitorización sobre dicha ladera, como técnicas GPS (desde 1995), técnicas radar desde satélite (InSAR, desde 2006) y técnicas radar terrestres (GB-SAR, desde 2010).

En este trabajo se estudian detalladamente las diferentes técnicas empleadas actualmente: topografía clásica, GB-SAR (técnicas Radar terrestres), GPS diferencial, extensometría de cable y piezometría, así como el tratamiento de los datos obtenidos por cada sistema para la obtención de desplazamientos y solución de los posibles problemas que surgen en este proceso, especialmente en el caso de GB-SAR, donde los datos tomados se ven fuertemente afectados por artefactos atmosféricos que es necesario estimar mediante modelos para poder obtener soluciones fiables.

Es conocido que en los últimos años se ha mejorado el uso de técnicas de teledetección activa (T.A.) para la observación del territorio, especialmente usando técnicas Radar (microondas). La interferometría Radar desde satélite (InSAR) ha permitido obtener modelos digitales del terreno (MDT) mejorados, y también realizar un seguimiento de los cambios o movimientos del terreno (DInSAR). En estos momentos está en etapa de desarrollo y validación el uso de técnicas Radar desde el suelo (GB-SAR). Las medias que se obtienen con los pocos equipos disponibles se han de corregir, estudiar y comparar con los movimientos detectados por otras técnicas 'clásicas' para validar los resultados y demostrar las posibilidades y/o limitaciones. El trabajo que se propone está pensado en este campo de comprobación y verificación, dentro del marco del proyecto europeo SAFELAND del 7FP (*Seventh Framework Programme for research and technological development*) que está actualmente desarrollándose con participación de la UPC y del *Institut de Geomàtica*.

La mayoría de los sistemas que se presentan en este trabajo pueden considerarse clásicos y conocidos, pero por lo anteriormente expuesto, el trabajo se centra en la medida de desplazamientos mediante técnicas interferométricas desde el suelo (GB-SAR), así como la problemática en su uso debido a diversos factores que se estudian a lo largo del trabajo. Para ello se emplea como escenario de validación la ladera de Vallcebre, dado que conocemos bien su comportamiento y además está monitorizada con otras técnicas que pueden servir para validar los resultados obtenidos con GB-SAR, objeto principal de estudio de este trabajo.

Las **tareas desarrolladas** para conseguir los objetivos se describen a continuación:

- Estudio de los antecedentes de la ladera de Vallcebre: emplazamiento, problemática, contexto geomecánico, geometría de la ladera, etc.
- Estudio técnico detallado de las características físicas y del tratamiento de datos de cada uno de los sistemas empleados: extensometría de cable, piezometría, GPS diferencial, GB-SAR y topografía clásica.
- Participación en campañas de toma de datos:
 - 2 campañas de toma de datos GB-SAR en Vallcebre y 3 en Canillo (Andorra).
 - 2 campañas de topografía clásica en Vallcebre como apoyo a las campañas de GB-SAR.
 - 1 campaña de toma de datos GPS en Vallcebre.
- Optimización de la toma y procesado de datos de topografía clásica que se emplean como validación de los resultados obtenidos con GB-SAR (estacionamiento a altura libre, verificación de que la estación total realice la corrección por temperatura y presión, establecimiento de una pequeña red de puntos de control, etc). Procesado de una serie de datos de 7 campañas topográficas.
- Procesado de datos obtenidos mediante GB-SAR, topografía clásica y GPS diferencial.
- Validación de un modelo atmosférico sencillo existente a partir de los datos meteorológicos medidos en diferentes *corner reflectors* de Vallcebre (técnica GB-SAR) y los resultados de fase obtenidos en una medición en continuo de 19 días en noviembre de 2010 (unos 5000 interferogramas): análisis espacio-tiempo.
- Caracterización atmosférica en campañas GB-SAR a partir de medidas de fase a diferentes blancos situados en zona estable a diferentes distancias y obtención final de desplazamientos de la campaña en continuo de 19 días.
- Validación de resultados obtenidos con técnicas GB-SAR a partir de resultados obtenidos mediante otras técnicas (topografía clásica).

La presentación del trabajo se ha dividido en **tres partes fundamentales**.

- **Parte I:** en él se hace una introducción al caso de estudio (ladera de Vallcebre), con una explicación global de antecedentes y su problemática, describiendo de forma global las características geométricas, geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas de la ladera.
 - **Parte II:** en él se estudian las diferentes técnicas de monitorización empleadas. De cada una de ellas se detalla su principio físico de funcionamiento, el *modus operandi* seguido para realizar mediciones en campo, las características y calidad de los datos obtenidos y el procesado de los mismos para obtener el resultado final (desplazamientos). Finalmente se lleva a cabo una comparativa entre técnicas de cara a determinar ventajas e inconvenientes de su uso para el caso particular de la determinación de deslizamientos en laderas inestables.
 - **Parte III:** en este bloque se lleva cabo el tratamiento de los datos obtenidos con los diferentes sistemas de monitorización, especialmente el tratamiento de datos obtenidos con técnicas radar terrestres GB-SAR, datos que es necesario corregir de errores atmosféricos mediante la aplicación de modelos, dado que las señales enviadas se ven afectadas al atravesar la atmósfera, cosa que afecta a la calidad de los resultados obtenidos. Dichos modelos atmosféricos se aplican y *testean* de cara a determinar la adecuación de cada uno de ellos para corregir las imágenes de dichos errores atmosféricos. Por un lado se aplica un modelo atmosférico sencillo basado en la medición de la temperatura, humedad y presión atmosférica a lo largo de las observaciones y por otro lado un modelo basado en ajustar una función (lineal o cuadrática) que determine como afecta la atmósfera sobre la fase en función de la distancia entre el blanco y el sensor, para lo cual es necesario disponer de puntos fijos sobre la ladera y obtener la fase medida con GB-SAR a los mismos; dicha fase se corresponde en su totalidad a *artefactos atmosféricos* dado que el desplazamiento real es nulo. Para ello se emplean los datos de una campaña GB-SAR en continuo de 19 días (unos 5000 interferogramas). Finalmente el objetivo final era cruzar los datos obtenidos mediante los diferentes sistemas de cara a validar los resultados obtenidos con GB-SAR, pero no ha resultado posible obtener los datos de extensometría, piezometría y GPS del período de tiempo estudiado. Únicamente contamos con una validación efectuada con topografía clásica de cara a verificar que los puntos fijos considerados lo son realmente.
- Parte IV:** se incluyen las conclusiones de los diversos apartados que componen el trabajo, así como de las observaciones realizadas y sus resultados.

2. Situación de Vallcebre

Vallcebre es un municipio de 272 habitantes [INE 2009] y con una extensión de 27,87 km². Se encuentra situado en la comarca del Berguedà (Cataluña), a unos 140 km al norte de Barcelona, perteneciendo por lo tanto a los Pirineos Orientales (zona pre-pirenaica) (figura 1).



Figura 1. Situación de Vallcebre en Europa [4]

Al norte limita con los municipios de Gisclareny y Guardiola de Berguedà, coincidiendo con el río de Saldes hasta poco antes de su confluencia con el río Llobregat. Por el sur limita con los términos municipales de Fígols y Cercs (figura 2).

La altura sobre el nivel del mar del municipio varía sobre los 960 msnm y los 2271 msnm del “Serrat Voltor”. Sus coordenadas geodésicas son: $\phi = 42^{\circ}12'20''N$; $\lambda = 1^{\circ}49'10''E$ (ETRS89).

El clima puede considerarse sub-mediterráneo, caracterizado por un régimen medio anual de precipitaciones de 925 mm pero con una marcada variabilidad anual, y una temperatura media de 9°C. La característica más destacable de la climatología viene definida por una marcada estacionalidad de régimen hídrico y térmico.

Se han definido dos estaciones húmedas: primavera y otoño, con una distribución temporal de las precipitaciones homogénea y dos estaciones secas: invierno, con precipitaciones en forma de nieve, y verano, con pocas precipitaciones y altas temperaturas, seguido de períodos de fuertes precipitaciones puntuales muy intensas y de corta duración.

Tradicionalmente ha sido un municipio basado en la agricultura y la ganadería hasta que a mediados del siglo XIX la actividad minera transformó la realidad social y paisajística

consolidándose como el principal motor económico del municipio, produciéndose un incremento poblacional considerable hasta superar los mil habitantes [INE 1960].

El pueblo está formado por un pequeño núcleo urbano además de un centenar de masías diseminadas por todo el municipio. Todo ello rodeado por una muralla natural, los Cingles de Vallcebre: un espectacular sinclinal de decenas de kilómetros de calcáreas. La ladera de estudio se encuentra a unos 1000 metros al oeste del núcleo municipal (figura 3).

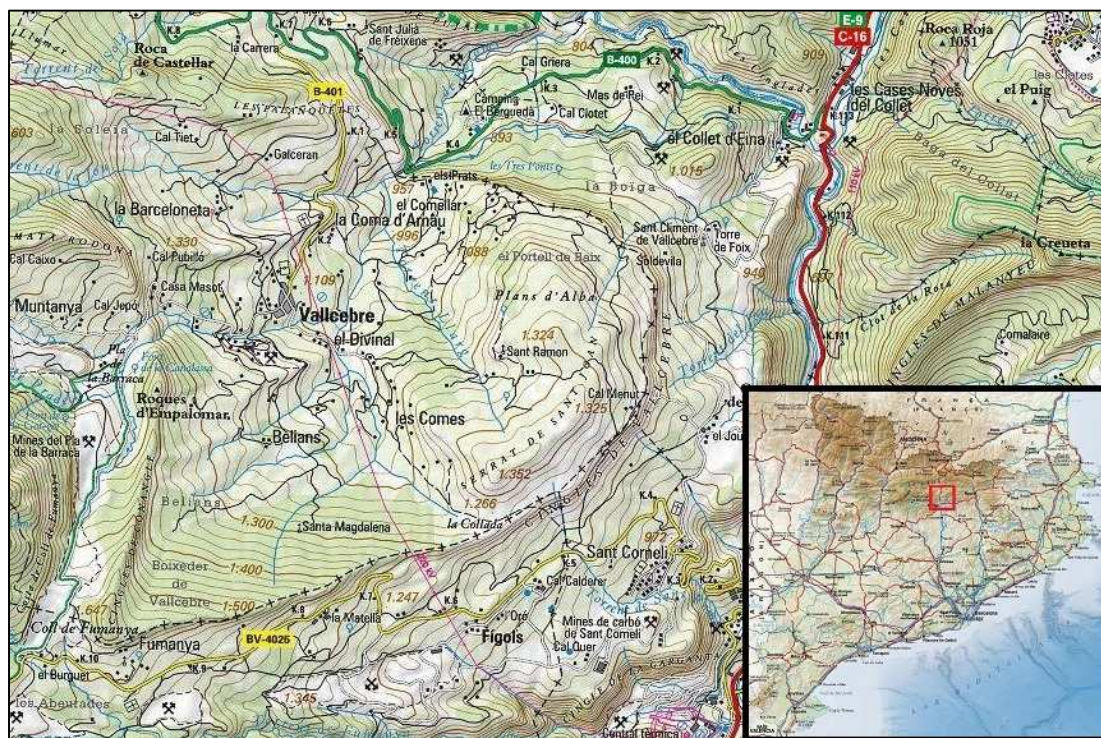


Figura 2. Situación de Vallcebre en Catalunya. Fuente ICC, serie 1/50.000 [4]



Figura 3. Situación de la ladera inestable de Vallcebre. Ortofotografía serie 1/50.000 [4]

3. Geometría de la ladera de Vallcebre

La ladera de Vallcebre es una ladera activa situada en la zona norte de la cuenca del río Llobregat, en las cercanías del núcleo urbano de Vallcebre. La ladera se desarrolla sobre la vertiente del Serrat de Sant Joan, al este del Torrent de Vallcebre y del Torrent Llarg.

Tiene unas dimensiones de unos 1200 metros de largo por unos 600 metros de ancho, que delimitan un área de 0,8 km² y un volumen estimado de 20 millones de metros cúbicos de tierras (figura 4). La inclinación media de la ladera es de unos 17°. Se desconoce con seguridad la edad del deslizamiento, pero se sabe que lleva activo varios siglos.



Figura 4. Fotografía de la ladera inestable de Vallcebre (Serrat de Sant Joan). En la parte inferior se intuye la existencia del torrente de Vallcebre, a la izquierda la barrera calcárea lateral y en la parte superior la cicatriz de la Serra de la Llacuna.

La ladera de Vallcebre es de tipo traslacional con rotura profunda. En los deslizamientos traslacionales la rotura tiene lugar a favor de superficies planas de debilidad preexistentes (superficie de estratificación, contacto entre diferentes tipos de materiales, superficie estructural, etc. y en ocasiones el plano de rotura es una fina capa de material arcilloso entre estratos de mayor competencia). No suelen ser muy profundos, aunque sí muy extensos y alcanzar grandes distancias. Son frecuentes en este tipo de inestabilidades los movimientos a impulsos o en fases diferentes en el tiempo según las condiciones de resistencia de los planos de deslizamiento, que no tienen por qué presentar una pendiente elevada. Generalmente, los

deslizamientos traslacionales son más rápidos que los rotacionales, dadas las características cinemáticas del mecanismo de rotura [6].

De forma genérica se establece que las laderas inestables traslacionales son frecuentes en suelos cohesivos homogéneos, la rotura de los cuales presenta una superficie curva. Las dimensiones habituales varían entre varias décimas y cientos de metros, tanto en longitud como en anchura, y pueden ser superficiales o profundas. Se asocian a pendientes entre 20 y 40°, y una relación de profundidad por longitud de 0,3 a 0,1 [6].

En este tipo de laderas inestables las evidencias visibles más destacables son:

- En la cabecera y parte superior de la vertiente aparecen grietas de tracción y curvas cóncavas orientadas hacia la propia vertiente, cicatrices curvas con estrías, superficies basculadas con charcos, contrastes de vegetación, malas condiciones de drenaje y charcos de agua en las depresiones.
- Al pie de la ladera presenta depósitos convexos lobulares y desvío de cauces.

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. Los factores condicionantes o pasivos dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los desencadenantes o factores activos pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan las inestabilidades y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos. Estos factores o agentes que controlan los movimientos de laderas pueden agruparse en aquellos que contribuyen a reducir la resistencia al corte y aquellos que incrementan los esfuerzos de corte [6].

Existen sistemas de caracterización cualitativa de deslizamientos a nivel regional [6], tales como la identificación y morfología de la ladera, litología, estructura de los materiales rocosos, tipo y grosor de los estratos, vegetación, procesos actuantes (erosión, tectónica, sismología, etc.), grietas del terreno, afectaciones a las edificaciones, modelos de drenaje, etc. En la tabla 1 se muestra el procedimiento a seguir para el estudio de laderas inestables.

La ladera de Vallcebre está compuesta por tres unidades morfológicas principales y claramente diferenciadas, cuyo grueso disminuye a medida que nos acercamos al pie de la ladera, con perfil escalonado, llamadas respectivamente unidad superior, unidad intermedia y unidad inferior (figura 5) [5]. En la figura 6 se muestra un esquema geomorfológico de la ladera, en la que se muestran las tres unidades, con información acerca de la localización de los puntos monitorizados y los sondeos, así como la localización de edificaciones afectadas.

En la figura 7 se muestran dos secciones de la ladera, en las que se aprecian claramente la delimitación de las tres unidades geomorfológicas descritas, así como la potencia de las diversas capas y la localización de fallas y sondeos.

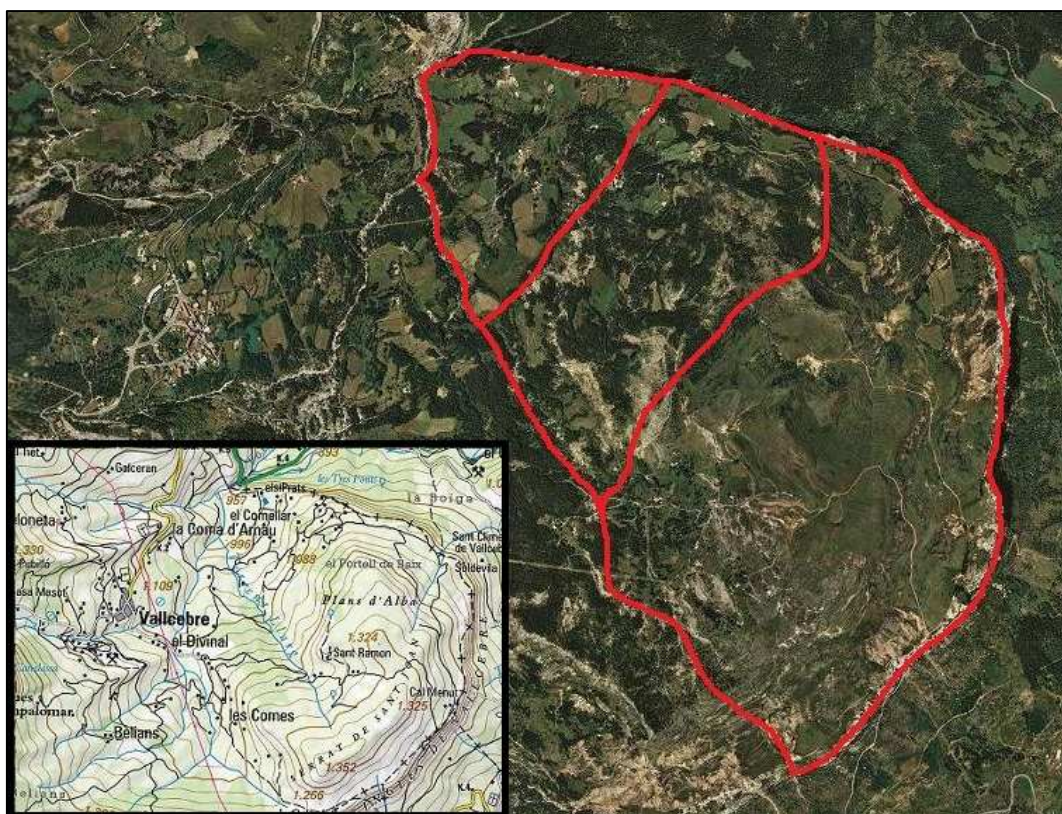


Figura 5. Delimitación de las tres unidades geomorfológicas principales de la ladera de Vallcebre. Ortophotografía serie 1/25.000 [4]

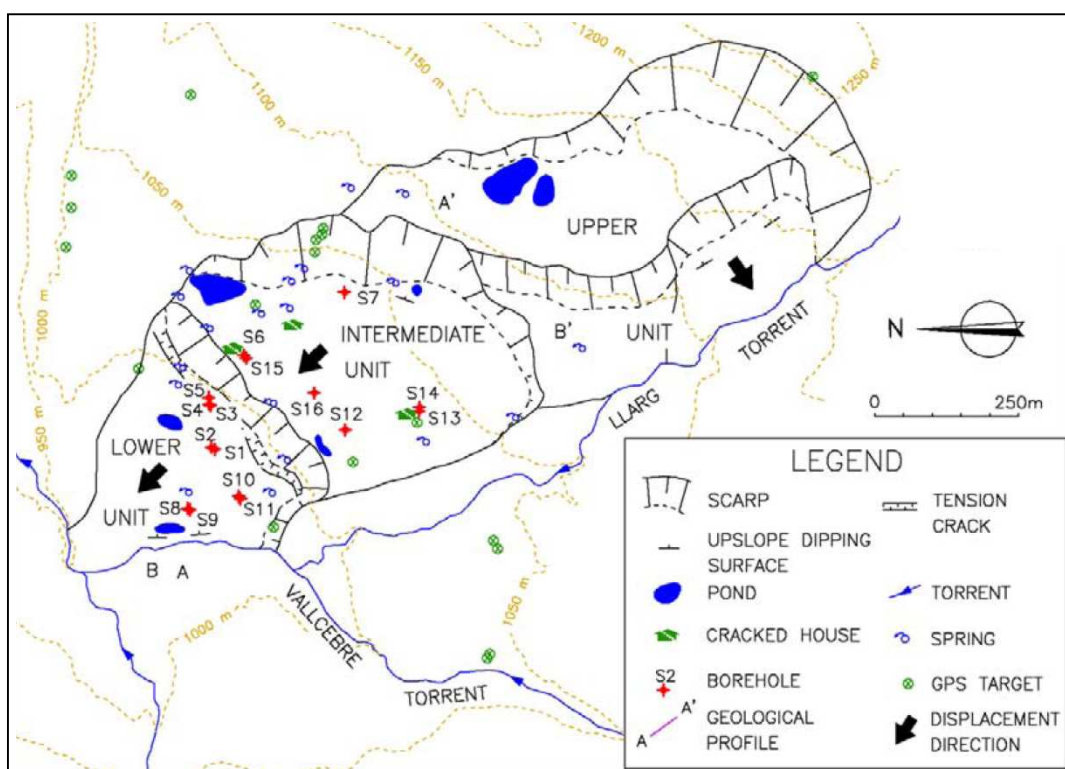


Figura 6. Esquema geomorfológico de la ladera de Vallcebre, en el que se aprecian las tres unidades: superior, intermedia e inferior. [5]

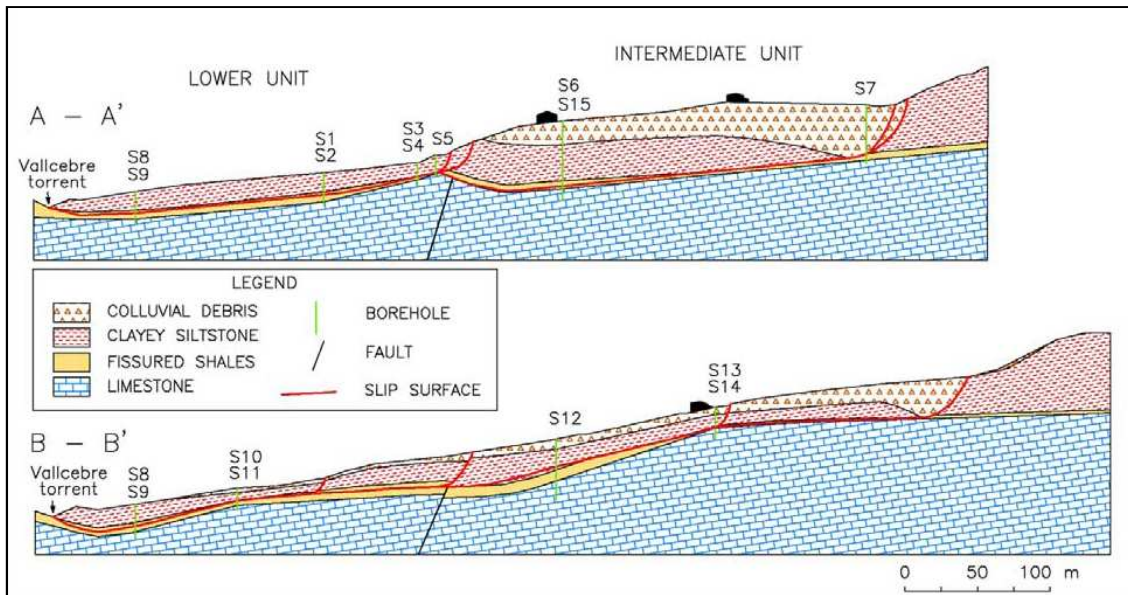


Figura 7. Secciones geológicas de la ladera de Vallcebre (la localización de los perfiles aparece sobre el esquema de la figura 6) El material movilizado consiste en un conjunto de arcillas densas, yeso y limolitas arcillosas blandas, que se deslizan sobre un lecho de piedra caliza de gran espesor. [5]

Los registros en sondeo han determinado que el espesor de tierras en la unidad inferior de la ladera es de entre 14 y 20 metros, siendo de tan solo de 5 - 7 metros al frente de la misma, mientras que en la unidad intermedia es de hasta 50 metros. La superficie de rotura del deslizamiento deducido a partir de las lecturas de los inclinómetros es de unos 10° hacia el torrente de Vallcebre y permanece aproximadamente paralelo a la superficie de la ladera, de 17° de inclinación promedio. Los registros inclinométricos indican que la dirección predominante del movimiento es hacia el noroeste (hacia el torrente de Vallcebre) [3].

La mayor parte de evidencias de la deformación se concentran en los límites entre unidades, apareciendo grietas superficiales. En la zona superior o límite de cada unidad se desarrolla una zona de tracción, que se traduce en una depresión en el terreno o graben. La presencia de dichas zonas de tracción indica que las unidades inferiores se desplazan más rápidamente que las unidades superiores [5].

Otras evidencias del movimiento se observan en los límites entre las unidades inestables y las zonas estables, al producirse el deslizamiento lateral entre ellas, apareciendo cicatrices o fisuras en dichas zonas. Por otro lado, en el interior de cada unidad a penas aparecen pequeñas fisuras y cicatrices de poca importancia, afectando ligeramente a las edificaciones existentes (pequeñas fisuras y grietas en muros) [5].

El área más activa es la unidad inferior (figura 8), que limita en el lado suroeste con los torrentes de Vallcebre y Llarg y, en su lado noreste, por una superficie de corte lateral bien definida (zona rocosa estable). Por tanto es la que muestra más desplazamientos, que pueden superar los 50 centímetros anuales. La zona inferior de dicha unidad se encuentra erosionada constantemente por el torrente de Vallcebre (figura 9).



Figura 8. Fotografía de la ladera inestable de Vallcebre, en la que se indica la localización de la unidad inferior, la más activa de las tres. Fuente: Institut de Geomàtica.

El deslizamiento de tierras se extiende hasta el lecho del torrente de Vallcebre, que lo empuja hacia la ladera opuesta. Como resultado, el torrente de Vallcebre se ha desplazado hacia el oeste más de diez metros. El pie de la ladera “empuja” la ladera opuesta, actuando como dispositivo natural de contención. De todas formas, el torrente socava el pie del deslizamiento durante los períodos de fuertes lluvias, anulando este dispositivo natural de contención y causando fallas locales de rotación que disminuyen la estabilidad general de toda la ladera [5].



Figura 9. Fotografía del pie de la ladera que está siendo socavada y erosionada por el torrente de Vallcebre [5].

Los perfiles inclinométricos indican que la superficie de rotura se da en una capa estrecha de deslizamiento donde los estratos superiores que deslizan se comportan como una unidad indeformable. El plano de deslizamiento se desplaza a través de la capa de arcillas densas, con una inclinación de 17º, similar a la inclinación topográfica en superficie [5].

Ámbito	Fases	Métodos y técnicas	Finalidad
Investigación de áreas inestables	Estudios preliminares	Revisión de información y cartografías existentes	Identificación de los procesos y tipos de movimiento. Identificación de los factores condicionantes
		Interpretación de fotos áreas y teledetección	
	Reconocimientos generales	Observaciones de campo. Cartografía de los procesos Cartografía de los factores	Evaluación general de la estabilidad de la zona
	Estudio de los procesos y de los factores que causan	Reconocimiento de campo	Descripción y clasificación de los procesos de los materiales. Análisis de la susceptibilidad en base a la presencia de procesos y concurrencia de factores condicionantes
Investigación preliminar del subsuelo: geofísica			
Investigación de deslizamientos particulares	Investigaciones en detalle	Observaciones y medidas en afloramientos	Descripción y clasificación de los movimientos. Datos morfológicos, geológicos, hidrogeológicos y geomecánicos.
		Sondeos, geofísica, ensayos de campo, toma de muestras	
	Instrumentación	Ensayos de laboratorio	Datos de velocidad, dirección, situación de planos de rotura, presiones de agua
		Inclinómetros, extensómetros, tiltímetros, piezómetros.	
Análisis de la estabilidad	Equilibrio límite. Modelos matemáticos tenso-deformaciones.	Definición de los modelos y mecanismos de rotura. Evaluación de la estabilidad. Diseño de medidas correctoras	

Tabla 1. Investigación de deslizamientos [6].

A la ladera de Vallcebre le corresponde un nivel de susceptibilidad medio (ladera de tierras con pendientes de 10º-35º) y según la tabla 2 tiene una escala de velocidad del movimiento de la ladera de clase 1-2 (entre muy lento y extremadamente lento: $4 \cdot 10^{-5}$ mm/s – $5 \cdot 10^{-7}$ mm/s). En este caso, se considera que las estructuras permanentes no resultan afectadas en general y que su movimiento puede resultar imperceptible si no es mediante instrumentación. Por ello determina que es posible la construcción con precauciones [6].

Todo ello es aplicable a cada unidad por separado, y no es en ningún caso aplicable para la zona límite entre unidades de movimiento, en las que se producen grietas importantes y zonas de depresión (grabens). Por otro lado, es importante tener en cuenta que en determinadas

épocas de lluvias intensas el movimiento en la unidad inferior puede superar con creces el movimiento “muy lento” de la escala de velocidades de movimiento, por lo que es conveniente no edificar en dicha zona.

Clase	Descripción	Velocidad (mm/seg)	Valores típicos	Daños probables
7	Extremadamente rápido	$5 \cdot 10^3$	5 m/s	Violento y catastrófico. Destrucción de edificios por impacto de la masa deslizada. Número elevado de muertos.
6	Muy rápido			Es difícil escapar. Algunos muertos. Destrucción de edificios y estructuras.
5	Rápido	$5 \cdot 10^1$	3 m/min	Es posible escapar. Destrucción de edificios y estructuras.
4	Moderado	$5 \cdot 10^{-1}$	1,8 m/h	Algunas estructuras pueden mantenerse temporalmente.
3	Lento	$5 \cdot 10^{-3}$	13 m/año	Pueden aplicarse medidas correctoras. Las estructuras y edificios pueden mantenerse.
2	Muy lento	$5 \cdot 10^{-5}$	1,6 m/año	Las estructuras permanentes no resultan dañadas en general.
1	Extremadamente lento	$5 \cdot 10^{-7}$	16mm/año	Imperceptible si no es con instrumentación. Es posible la construcción con precauciones.

Tabla 2. Escala de velocidad de los movimientos de ladera [6].

La unidad que presenta menor movimiento es el área superior (varios centímetros al año). Dado que la zona más activa es la inferior, el trabajo se centra fundamentalmente en la monitorización de dicha unidad.

4. Contexto Geomecánico

4.1. Contexto Geológico

Desde el punto de vista geológico, la zona de Vallcebre forma parte del manto inferior del Pedraforca, una capa que fue empujada hacia el sur cuando se formaron los Pirineos por compresión, debido a la colisión entre la Península Ibérica y Francia. De forma resumida, los materiales que constituyen esta zona pertenecen a la serie Maastrichtiense y Garumniense del manto inferior Pedraforca, de unos 65 – 70 millones de años de antigüedad, por lo que corresponden al período cretácico (finales) y terciario (principios) [7].

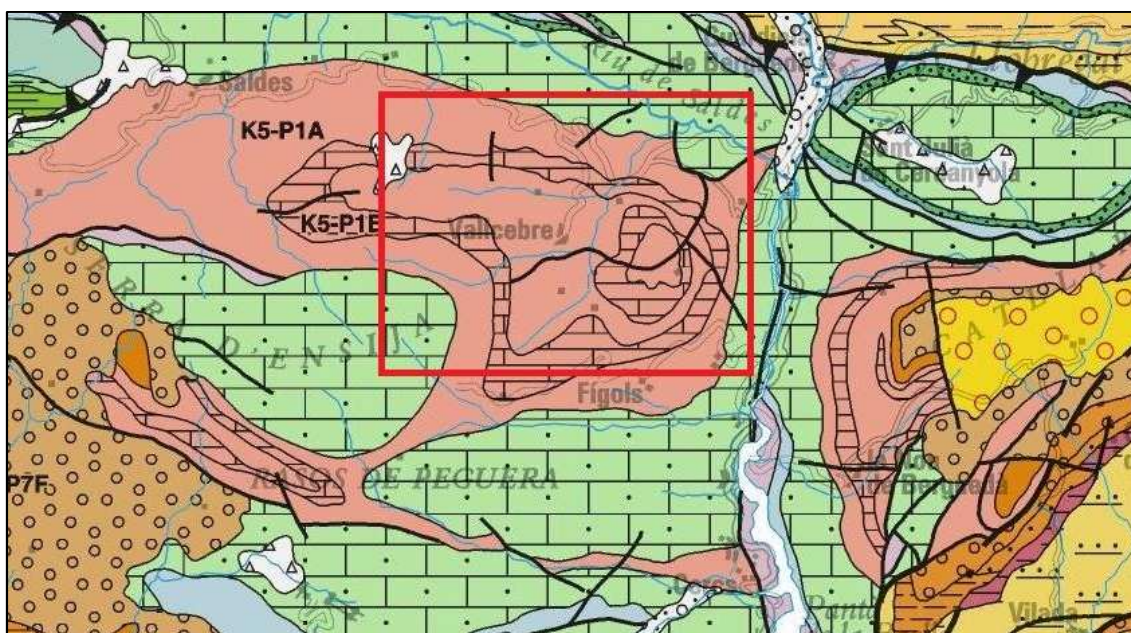
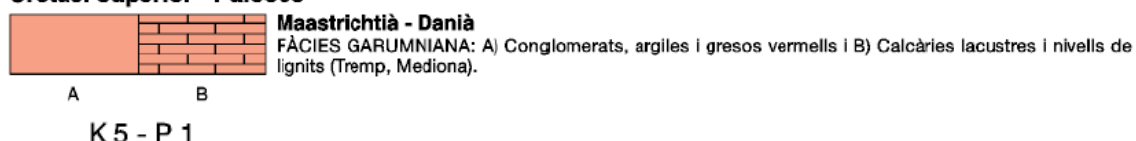


Figura 10. Mapa geológico de la zona de Vallcebre, serie 1:250.000. Era Mesozoica, ver leyenda inferior [4].

Cretaci superior - Paleocè



Desde un punto de vista geológico, el sinclinal de Vallcebre se encuentra en la que se puede considerar como la prolongación más oriental de la llamada Unidad Sur-pirenaica Central que corresponde, en sentido geográfico, a los Pre-pirineos. Esta unidad está compuesta por los mantos superiores de los Pirineos meridionales que en esta área están constituidos por láminas de encabalgamiento (los mantos superior e inferior del Pedraforca), que a su vez se encabalgan sobre su unidad alóctona inferior, el manto del Cadi. Estas láminas sufrieron su mayor intensidad de deformación durante el Paleógeno (65 – 25 millones de años), época en que se produjeron sus emplazamientos [8].

En geología llamamos alóctono a todo material que se ha originado en una cierta zona y que han sido arrancados de dicha zona o formación original para resedimentarse en otra región. Por otro lado, un sinclinal (figura 11) es la parte cóncava de un pliegue de la corteza terrestre debido a las fuerzas de compresión de un movimiento orogénico, cuyos estratos convergen hacia abajo, es decir en forma de cuenca.

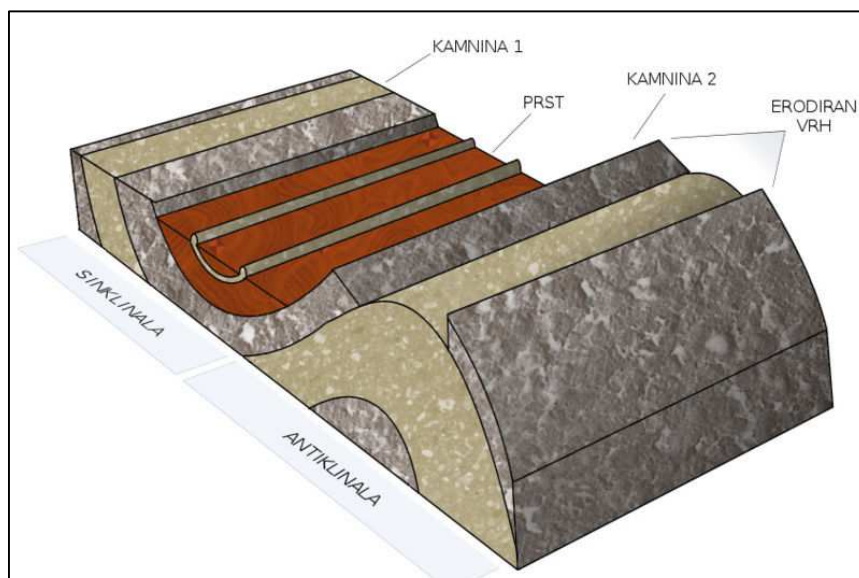


Figura 11. Esquema en el que se muestra un sinclinal y un antisinclinal [8b]

En el núcleo del sinclinal se encuentran los materiales continentales de la Formación de Tresp, también clásicamente conocida como garumniana. Estos materiales han sido el elemento central en las principales investigaciones estratigráficas y paleontológicas en la zona. Esta formación, junto con la formación *Arenisques d'Areny* (presente en otras cuencas pirenaicas), registra la regresión marina que tuvo lugar a finales del Cretáceo superior en los Pirineos y en el conjunto del área sur-europea. Ambas unidades han ofrecido durante décadas un registro muy destacado de huesos, huellas y huevos de varios vertebrados continentales en todo el Pirineo sur-central, siendo Vallcebre una importante zona de estudio paleontológico, debido a la gran biodiversidad existente a finales del cretácico y que muestra sus evidencias en forma de fósiles en la actualidad. [8].

La parte oriental del manto inferior del Pedraforca, en la zona de Vilada - la Pobla, forma una rampa lateral, la interferencia de la cuál con los pliegues de dirección E-W origina unas estructuras en forma de dos cubetas separadas por un anticlinal N-S (valle del Llobregat). La cubeta oriental es la de la Nou y el occidental es la de Vallcebre [9]. La cubeta de Vallcebre limita en el costado oeste con el final del perianticlinal de la Serra d'Ensija, plegando las capas del Garumniano con valores de 60º subverticales.

La unidad calcárea de Vallcebre presenta ya una edad terciaria (tramos garmunianos), que representan la parte final del ciclo del Cretáceo superior en los Pirineos. En la figura 12 se muestra el mapa geológico de la zona a escala 1:50.000.

En esta zona los deslizamientos están distribuidos en función de la presencia de las margas y de la formación superficial cuaternaria. La disposición de la formación superficial, que se encuentra en forma de capas muy finas por encima del sustrato de margas, hace que el terreno natural presente una discontinuidad casi paralela a la superficie del terreno, y se sitúa en el contacto de los dos materiales. Existe una diferencia de permeabilidad entre estos materiales que favorece la formación de deslizamientos superficiales, de tipo planar-traslacional, asociados en zonas con fuerte pendiente [10].



Figura 12. Mapa geològic de la zona de Vallcebre, serie 1:50.000. Ver leyenda. [4]

PPcm1	<i>Calcàries micrítiques amb microcòdium. Fàcies Garumnià. Calcàries de Vallcebre. Danià.</i>
PPcm2	<i>Calcàries amb microcòdium. Paleocè. Danià</i>
PPcm	<i>Calcàries micrítiques i argiles roges. Fàcies Garumnià. Maastrichtià.</i>
Qvl	<i>Clasts angulosos, sorres i llims. Ventalls al·luvials antics degradats. Plistocè-Holocè.</i>
Kgp	<i>Calcàries, lutitets i margocalcàries. Fàcies Garumnià. Maastrichtià.</i>
KMc	<i>Calcàries bioclàstiques. Constitueix part de la Seqüència d'Areny. Maastrichtià.</i>

Lo que más destaca del paisaje de Vallcebre es el ancho sinclinal de Fígols-Vallcebre, muy visible desde la Serra del Catllaràs, con los dos muros verticales de roca calcárea que se levantan sobre la banda derecha del desfiladero del Llobregat (figura 13). La pared inferior, la más impresionante, está tallada en calizas, margas y gres del cretácico superior. Encima de este escarpado rocoso, desde St. Corneli hasta Vallcebre, encontramos materiales del Garumniano (finales del cretácico – principios del paleoceno; 55 – 65 millones de años), con un grueso que puede llegar a los 850m. [11].

El gran rellano que encontramos sobre el escarpado rocoso y que resigue la base del mismo, corresponde al Garumniano inferior (65 millones de años) y se ha formado debido a la facilidad de erosión de sus materiales blandos. Aquí es donde se encuentran las margas grises portadoras de las capas de carbón y donde se encuentran huellas de dinosaurio [11].

El escarpado rocoso de Vallcebre forma el peldaño sobre el cual se extiende un amplio altiplano. Esta pared rocosa destaca por su verticalismo y por su color blanco característico; por esta razón las se han bautizado como calizas “*Clar de Lluna*”. Su grueso es de unos 40m y vallan el paso en Vallcebre, excepto en algunos pasos verticales [11].

Desde el punto de vista geomorfológico destaca la garganta de Foradada, cortada por el torrente de Vallcebre, que drena todas las aguas de la cubeta y desemboca al río de Saldes. Al pie de la Sierra de Ensija hay una gran falla donde afloran las margas y yesos de Keuper (triásico, 210 millones de años). Estos materiales también contienen sal gema, responsable de la elevada salinidad que caracteriza el torrente de Agua Salada de Saldes, un hábitat de gran interés biológico [11].



Figura 13. Sinclinal de Vallcebre. 1. Campaniense marino; 2. Unidades gris y roja inferior; 3: “muralla” de calizas de Vallcebre; 4: Unidad roja superior [12]

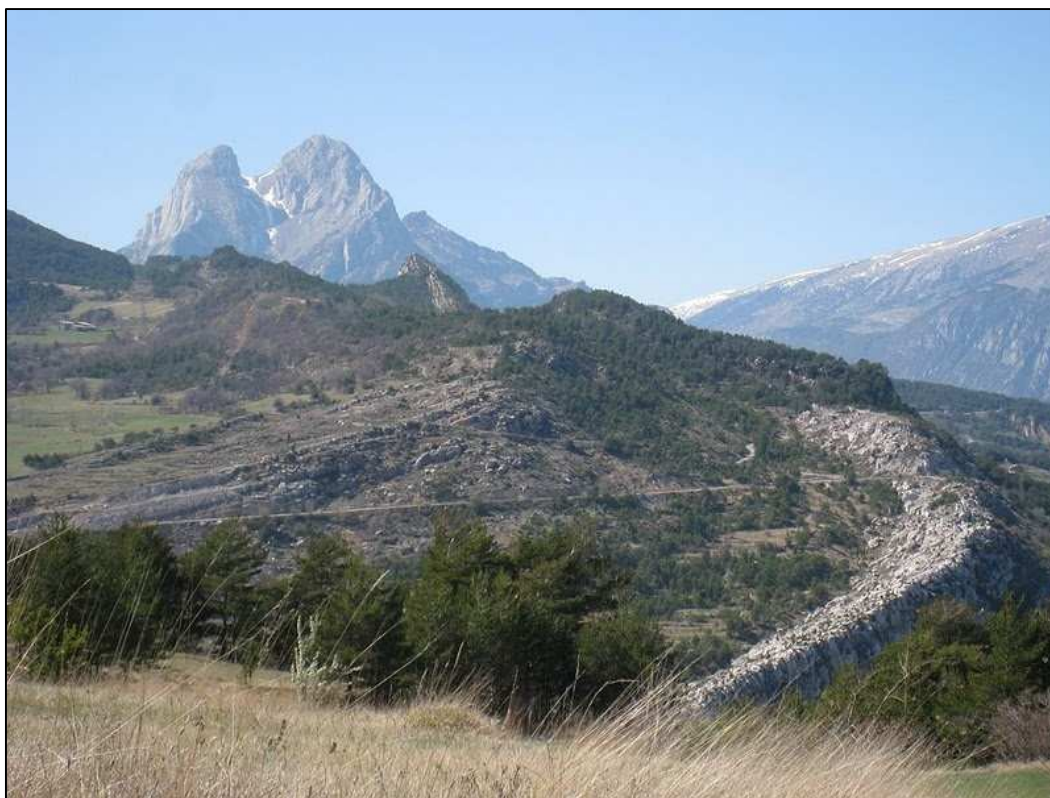


Figura 14. Sinclinal de Vallcebre. Escarpado rocoso de Vallcebre con el Pedraforca detrás.



Figura 15. Sinclinal de Vallcebre. Escarpado rocoso de Vallcebre con el Pedraforca detrás.



Figura 16. Sinclinal de Vallcebre. Escarpado rocoso de Vallcebre, donde se aprecia la “muralla” de calizas y la ladera de estudio a la derecha.



Figura 17. Sinclinal de Vallcebre. Escarpado rocoso de Vallcebre, donde se aprecia la “muralla” de calizas y la ladera de estudio a la derecha.

Geología local de la ladera

La estructura geológica de la ladera se ha establecido a partir de un estudio geológico y geomorfológico intenso, incluyendo la confección de mapas geológicos mediante inspección en superficie, ensayos geofísicos y la interpretación de material extraído de los sondeos.

El material movilizado consiste en un conjunto de capas que se comportan como una unidad dinámica indeformable, compuesta por arcillas compactas fisuradas, yesos y limolitas arcillosas de origen continental, que se deslizan sobre un lecho de piedra caliza de mucho espesor, los cuales pertenecen al Cretácico Superior - Paleoceno inferior (99 – 65 millones de años) [5]. Además la capa más superficial se encuentra una extensión de depósitos coluviales de granulometría heterogénea del pleistoceno – holoceno (1,5 millones de años).

Desde el fondo hasta la parte superior incluye (figura 7):

(1) arcillas compactas con un elevado grado de fisuración, 1 a 6 m de espesor, mostrando distintas caras friccionadas (pulidas) que se formaron durante el emplazamiento de la falla de empuje. Dichas caras pulidas se formaron a causa del movimiento de fricción entre las rocas a lo largo de los dos lados de la falla.

(2) a nivel local, lenticulas de yeso de hasta 5 m de espesor y unas decenas de metros de ancho que se hacen predominantes en el lado sur de la ladera (unidad inferior). Estas capas de yeso se encuentran frecuentemente entre 5 y 10 metros por encima de la superficie de deslizamiento.

(3) limolitas arcillosas blandas ricas en filones y micronódulos de yeso con un espesor de hasta decenas de metros (5-30m). Además de estas capas, en algunas zonas se han formado depósitos coluviales, compuestos por cantos rodados y grava con una matriz limosa.

En la parte superficial se encuentra una extensión de material coluvial de granulometría heterogénea del pleistoceno – holoceno (1,5 millones de años; período cuaternario).

Las arcillas compactas fisuradas a las que se refiere son concretamente lutitas, rocas sedimentarias muy típicas, compuestas por las partículas más finas de los sedimentos, formando un 'lodo' de limo y arcilla. Las limolitas son rocas sedimentarias compuestas principalmente por limos (2 a 20 micras).

Las lenticulas de yeso se ven afectadas por procesos de disolución y se han desarrollado fenómenos cársticos como conductos subterráneos (*pipes*) y manantiales (*ponds*) o fuentes naturales (*springs*). Estos conductos internos, que circulan cerca de la superficie topográfica, y los colapsos frecuentes (dolinas), se observan en la superficie del terreno y están dispuestas siguiendo unos caminos rectos.

La zona se ve afectada por dos fallas y algunos pliegues asociados. Una de estas fallas se encuentra bajo el deslizamiento de tierras y tiene un decalaje vertical de unos 10 m (figura 7). Además la ladera cubre un pliegue sinclinal que forma un núcleo grueso de arcillas, con una dirección de tendencia este-oeste y con un eje que se hunde hacia el oeste, más o menos paralelo a la dirección descendiente.

4.2. Contexto Geotécnico

Se han llevado a cabo diversos ensayos con muestras inalteradas obtenidas mediante los diferentes sondeos que se realizaron sobre la ladera por tal de determinar los parámetros y las características geotécnicas del suelo. Concretamente se realizaron ensayos de identificación básica del suelo, así como ensayos de corte directo y anular y ensayos triaxiales en condiciones no drenadas (CU). Se prestó especial atención a las pruebas para determinar la resistencia al corte del suelo que se encuentra en la superficie de deslizamiento. Finalmente se realizaron 14 ensayos de corte de los diferentes sondeos y a diferentes profundidades, así como 4 ensayos triaxiales CU con las arcillas compactas fisuradas [5]. Algunos de los resultados obtenidos se muestran a continuación en las tablas 3 y 4.

Estrato	Límite Líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad
Arcillas compactas fisuradas (<i>Fissured shales</i>)	41,8	22,1	19,7
Limolitas arcillosas blandas (<i>Clayey siltstones</i>)	54,5	35,2	19,3

Tabla 3. Límites de Atterberg obtenidos mediante ensayos de identificación [5].

Estrato	Intervalo de tensiones normales efectivas (kPa)	c' (kPa)	Ángulo de fricción Φ' (°)
Arcillas compactas fisuradas	$0 < \sigma' < 200$	0,0	23,4
	$200 < \sigma' < 700$	44,0	11,8
Limolitas arcillosas blandas	$0 < \sigma' < 400$	0,0	33,0
Superficie de rotura*	$0 < \sigma' < 800$	0,0	7,8

*Resistencia residual sobre la superficie de rotura pre-existente de las arcillas fisuradas.

Tabla 4. Parámetros de resistencia obtenidos mediante ensayos de corte y ensayos triaxiales no drenados CU [5].

Como se observa, la resistencia al corte medida sobre las arcillas densas fisuradas situadas en la superficie de rotura es menor que la resistencia medida de dichas arcillas densas que se encuentran en la masa movilizada de la ladera.

Por ello se ha observado que la resistencia de los materiales puede ser sobrestimada si adoptamos los valores residuales obtenidos mediante los ensayos de corte. Ello es debido probablemente a que el material de la ladera ha estado presumiblemente sometida a tensiones mucho más altas que en las condiciones actuales; el terreno se encuentra sobreconsolidado.

4.3. Hidrogeología

La instrumentación continua de la ladera de Vallcebre mediante piezómetros ha permitido la observación de la respuesta de la ladera al darse cortos pero intensos períodos de precipitaciones. Acompañando dichos piezómetros con extensómetros de cable, que registran en continuo el desplazamiento de la ladera, ha podido establecerse un claro sincronismo entre desplazamientos y niveles freáticos del interior de la ladera.

Los datos registrados por los piezómetros muestran una respuesta muy rápida a los episodios de lluvia, y dado que la ladera está compuesta fundamentalmente por materiales arcillosos muy poco permeables, ello indica que la infiltración del agua en el terreno está controlada por las fisuras y grietas (grabens), que son capaces de interceptar gran cantidad de agua de escorrentía [5]. Se puede deducir que las grietas actúan como vías de drenaje preferencial dentro de la ladera.

Por otro lado, el papel de la red kárstica de las lentículas de yeso es incierto, dado que su profundidad resta por encima del nivel normal de fluctuación del agua, por lo que podría desempeñar un papel secundario [5].

Además de la rápida respuesta a las entradas de la precipitación, todos los piezómetros muestran el resultado de un determinado nivel por debajo del cual el nivel freático disminuye muy lentamente [5].

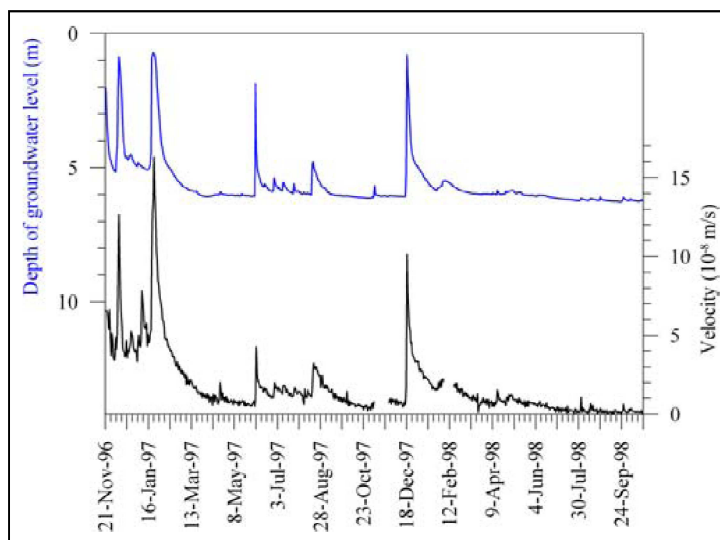


Figura 18. Registro piezométrico del nivel del agua y del extensómetro de cable que muestra la velocidad de desplazamiento de la ladera en el sondeo S2 [5].

Una estrecha relación entre los cambios de nivel del agua subterránea y la actividad de deslizamientos se midió utilizando un extensómetro de cable en el sondeo S2 (figura 18). Existe un fuerte nivel de sincronismo entre los dos registros. Además, la tasa de desplazamiento está fuertemente correlacionada con los datos de la capa freática. La

excepción a esto es el caso de enero de 1997 (incremento de velocidad sin incremento de la capa freática), que puede ser causada por otros factores (erosión de la zona baja de la ladera, es decir, por el torrente de Vallcebre) [5].

Dicha relación entre la velocidad de desplazamiento y la posición del nivel de agua subterránea observada sugiere que es posible realizar una simulación de los desplazamientos a partir de la piezometría. Esto constituye una vía para la predicción de velocidades que puede llegar a tener una ladera inmediatamente después de un período de precipitaciones. En [5] se desarrolla un modelo de desplazamientos de dicha ladera a partir de las características mecánicas del terreno, su geometría y los datos que registran los piezómetros. Todo ello se resuelve numéricamente en términos de desplazamiento, empleando métodos clásicos de diferencias finitas. Utilizando la misma aproximación numérica es posible derivar directamente la velocidad y aceleración de la ladera estudiada.

II. DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE MONITORIZACIÓN EMPLEADOS.

En este apartado se describen las diferentes técnicas de monitorización que se han empleado para el estudio del comportamiento de la ladera que es caso de estudio (Vallcebre): extensómetros de cable, piezómetros, sistemas radar terrestres, sistemas GPS y topografía clásica. Se describe el funcionamiento de cada una de las técnicas y el tipo de resultados que se esperan obtener en cada caso. Finalmente se realiza una comparativa entre técnicas en cuanto a ventajas e inconvenientes de cada sistema o técnica empleados y unas conclusiones.

1. EXTENSÓMETROS DE CABLE

El extensómetro de cable es un instrumento de medición de desplazamientos muy indicado en la medición del desplazamiento traslacional de laderas inestables [13].

1.1. INTRODUCCIÓN

Habitualmente las técnicas de medida de deformaciones funcionan a partir de campañas de medición puntuales, a partir de las cuales obtenemos el diferencial de desplazamiento entre largos periodos de tiempo (habitualmente meses o algún año). En este caso consideramos que la velocidad a la que se han producido dichos desplazamientos es constante en el tiempo entre ambas campañas de medición.

No obstante, asumir que la deformación es constante en el tiempo nos lleva a una interpretación muy pobre sobre el comportamiento real de la ladera, dado que puede haber intervalos de tiempo en los que se producen aceleraciones en el movimiento y otros intervalos en los que la ladera permanece inmóvil. Por ello, resultará difícil establecer una relación entre las precipitaciones o presiones intersticiales registradas y el comportamiento real de la ladera. Esta relación nos interesa dado que las precipitaciones tienden a acelerar los desplazamientos.

Por este motivo, es necesario emplear un instrumento de medición que permanezca en el lugar y que sea capaz de registrar las medidas continuamente. Un claro ejemplo de este tipo de equipos de medición es el extensómetro de cable, que incorpora una unidad que registra y almacena los datos en continuo cada cierto intervalo de tiempo, por ejemplo cada 20 minutos.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El extensómetro de cable es un mecanismo sencillo y barato que permite medir desplazamientos relativos entre dos puntos, uno de ellos en la masa de la ladera que se encuentra en movimiento y el otro punto en la zona estable inferior a dicha masa. Para ello es necesario realizar un sondeo vertical en profundidad hasta la zona estable de la ladera.

El sistema consiste en un sondeo entubado y anclado a la zona estable de la ladera, bajo la superficie de deslizamiento de la masa inestable, dentro del cual introducimos un cable metálico debidamente protegido (envainado) que anclamos en el fondo del sondeo, y que por otro lado sale hacia la superficie, atravesando la superficie de deslizamiento de la ladera. En la superficie se encuentra una polea, alrededor de la cual se coloca el cable, que se mantiene a tensión gracias a un contrapeso. El movimiento de la ladera producirá movimiento del cable y consecuente giro de la polea, que se registra mediante un potenciómetro instalado en el eje de la misma. El potenciómetro proporciona una señal eléctrica que es proporcional al ángulo de rotación de dicha polea, y queda registrado en una unidad de almacenamiento (figuras 19, 20 y 21).

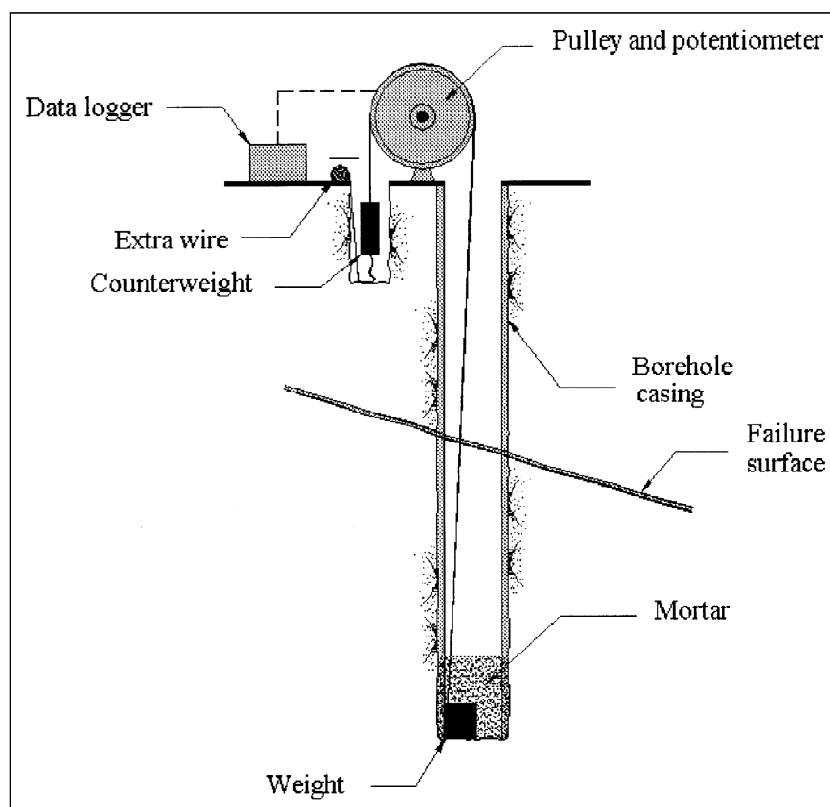


Figura 19. Esquema de un extensómetro de cable [13].

El sistema incorpora asimismo una unidad de alimentación, compuesta por unas baterías, además de unas placas solares que pueden ser instaladas para recargar dichas baterías automáticamente (figura 22).

El sistema tiene la ventaja de permitir grandes desplazamientos (metros), al contrario de lo que ocurre con otros sistemas como por ejemplo los inclinómetros [13].



Figuras 20 y 21. Extensómetro de cable en Vallcebre. Se aprecia claramente el tambor, el sondeo en el que se introduce el cable, la cavidad para colocar el contrapeso, etcétera.



Figura 22. Emplazamiento de tres sondeos, correspondientes a extensómetro, inclinómetro y piezómetro, así como una placa solar que sirve de fuente de alimentación.

1.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los desplazamientos medidos con el cable se corresponden al módulo del desplazamiento, y en ningún caso es capaz, por si solo, de proporcionar las componentes horizontal y vertical del mismo, aunque las lecturas pueden corregirse tras calibración para obtener el desplazamiento horizontal, tal y como se describe en [13].

En la fase inicial, tras instalar el extensómetro, se mide un desplazamiento que no se corresponde con el real de la ladera, y que es incluso negativo (figura 23). Esta primera fase no

lineal está descrita en [13], y depende de la profundidad, ángulo y grosor de la zona de rotura, del diámetro del sondeo y de su deformación en dicha zona. Se puede afirmar que el extensómetro mide deformaciones menores a las que se producen realmente.

Cuando se ha producido un desplazamiento mucho mayor al grosor de la zona de rotura, el desplazamiento medido por el cable y el que se produce realmente tienden a coincidir (figura 24), aunque el desplazamiento total acumulado medido por el cable siempre será menor al real. La precisión nominal del sistema es de aproximadamente 1 mm.

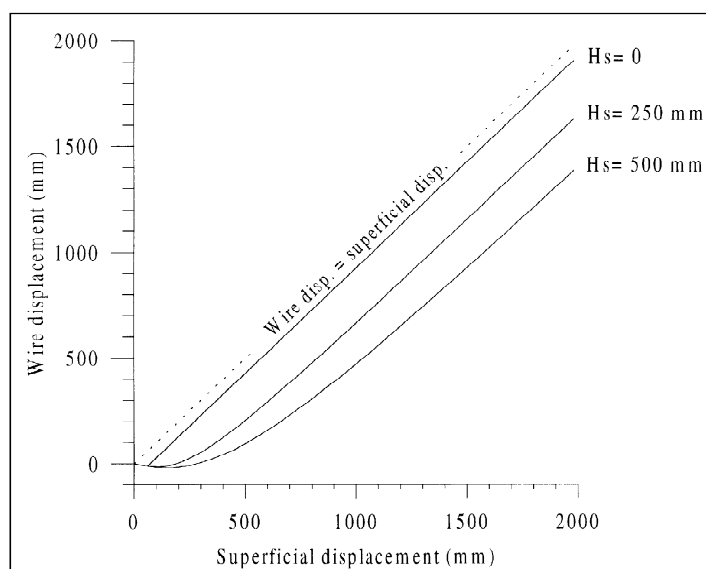


Figura 23. Se muestra la relación entre el desplazamiento real y el del cable para diferentes casos, donde H_s es el grosor de la superficie de rotura. Existe una fase inicial no lineal, que es más grande cuanto más lo es H_s . Una vez superada, pasamos a una fase lineal, en la que los desplazamientos medidos entre dos instantes será igual al desplazamiento real de la ladera, pero no el desplazamiento total acumulado desde el instante cero [13].

Es habitual complementar el uso de inclinómetros junto a los extensómetros de cable, a pesar de que los inclinómetros tienen una corta vida, ya que quedan fuera de servicio tras deformaciones de pocos centímetros. Aún así, proporcionan una información de calidad en cuanto a la posición de la superficie de deslizamiento de la ladera y su ángulo de inclinación en el momento justo de instalarlos. Una vez los inclinómetros queden fuera de servicio, esta información será vital para poder conocer las componentes vertical y horizontal del desplazamiento a partir de la medida con el cable extensométrico [13].

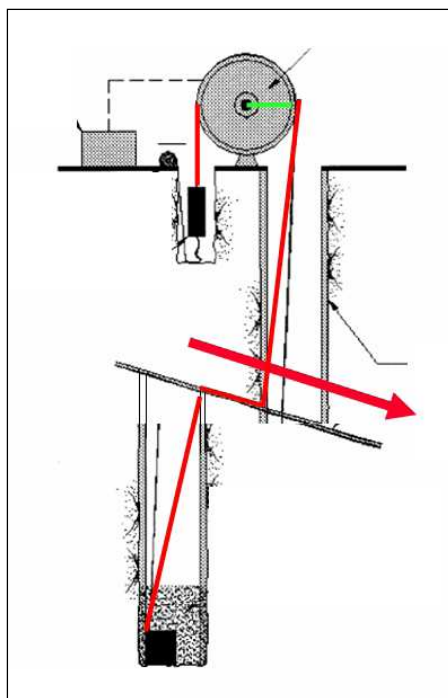


Figura 24. Esquema de un extensómetro una vez se ha producido cierto desplazamiento. La trayectoria del cable se muestra en color rojo [14].

2. PIEZÓMETROS

Un piezómetro es un instrumento que se emplea para medir la presión intersticial o altura/nivel del agua en perforaciones, sondeos, etc. Existen muchos tipos de piezómetros, siendo el más empleado en la actualidad y más robusto el de cuerda vibrante.

2.1 PIEZÓMETROS DE CUERDA VIBRANTE. FUNCIONAMIENTO.

Los piezómetros de cuerda vibrante se hincan en el terreno a la profundidad deseada para medir su presión intersticial y determinar la posición del nivel freático (figura 25). Es un instrumento automatizable muy robusto y que se puede instalar de forma permanente para monitorizar la toma de datos, registrando dichos datos cada cierto tiempo, por ejemplo cada 20 minutos.

Funciona transmitiendo la presión del agua intersticial del terreno a una membrana flexible solidaria a una cuerda de acero. La presión de agua provoca que la membrana se desvíe de su posición inicial, reduciendo la tensión del cable y cambiando la frecuencia vibratoria medida por la bobina electromagnética que trasmite la señal al aparato de lectura. El equipo dispone de un sistema eléctrico capaz de inducir una vibración en la cuerda, y asimismo medir su frecuencia [15] (figura 26). Una imagen de un piezómetro real se puede ver en la figura 27.

Con el fin de asegurar la continuidad hidráulica del agua intersticial con la membrana flexible, el equipo debe disponer de una piedra porosa de alto valor de entrada de aire en contacto con el terreno. Dicha piedra porosa debe saturarse antes de la colocación del terreno, ya que la presencia de agua en la misma podría interrumpir la continuidad hidráulica en el circuito de medida: hay que asegurar siempre la conexión hidráulica entre el punto a medir y el elemento de medida.

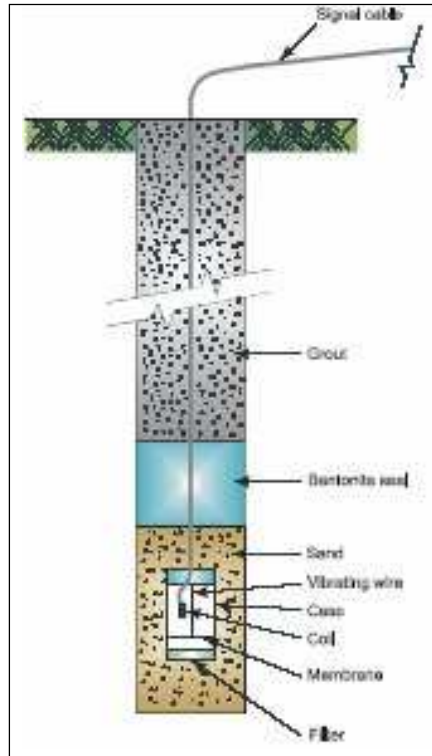


Figura 25. Esquema de un sondeo con un piezómetro de cuerda vibrante [16].

Cuando el suelo es poco permeable, como es el caso de arcillas, hay que tener en cuenta el tiempo de estabilización, es decir, el tiempo que tardan en igualarse la presión de agua en el terreno y la presión de agua en el interior del aparato de medida. En ocasiones la estabilización puede durar varios días.

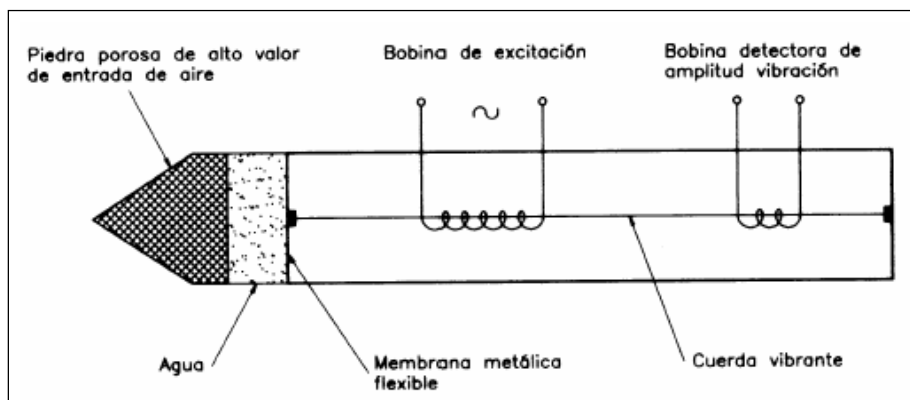


Figura 26. Esquema de un piezómetro de cuerda vibrante [15].



Figura 27. Fotografía de un piezómetro real antes de ser introducido en un sondeo.

2.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Dado el tipo de estudio que se lleva a cabo y a la naturaleza del comportamiento de laderas de este tipo, especialmente arcillosas, los resultados piezométricos que se obtienen guardan gran relación con los desplazamientos que se producen. Podemos afirmar que la aparición de precipitaciones producirá un aumento de presión intersticial, y que este aumento producirá una aceleración en el desplazamiento traslacional de la ladera, desplazamiento inducido por la reducción de tensiones efectivas, que como sabemos depende directamente del aumento de presiones intersticiales que produce el incremento de agua subterránea [17].

Cuando está combinado con los piezómetros, el cable extensométrico tiene una gran capacidad para reproducir la respuesta a la precipitación y a las fluctuaciones del agua subterránea con un alto grado de exactitud. También permite que las tendencias temporales del desplazamiento sean estudiadas durante acontecimientos lluviosos críticos. Los índices de desplazamiento obtenidos con el cable pueden ser fácilmente correlados con los datos de la precipitación y de las fluctuaciones del agua subterránea [13].

La reactivación o aceleración del deslizamiento de la ladera pueden ocurrir en períodos muy cortos de tiempo debido a la aparición de precipitaciones repentinas. Cruzando la información sobre los desplazamientos medidos con el extensómetro de cable y los datos piezométricos es posible concluir que existe una relación proporcional entre presión intersticial y aceleración en el movimiento de la ladera [13].

A mayores precipitaciones mayores serán las presiones intersticiales registradas y se producirá una aceleración en los desplazamientos de ladera medidos.

3. RADAR DE APERTURA SINTÉTICA TERRESTRE (GB-SAR)

Este capítulo describe los conceptos generales de la teledetección SAR, más concretamente la modalidad terrestre, conocida como *Ground-Based Interferometric Synthetic Aperture Radar* (GB-SAR), así como los principios básicos de funcionamiento de esta técnica y los resultados que se obtienen.

El GB-SAR es una técnica de teledetección activa terrestre relativamente moderna (unos 10 años de antigüedad), que emplea ondas radar para estimar movimientos y deformaciones de la superficie terrestre, con una precisión nominal milimétrica. El hecho de que se trate de un sistema de teledetección activa tiene ciertas ventajas respecto a los sistemas de teledetección pasiva, ya que el sistema proporciona su propia fuente de energía (emite ondas electromagnéticas). Esto es una ventaja ya que pueden trabajar bajo cualquier condición atmosférica, y por supuesto de noche. Se trata de una ventaja considerable frente a técnicas de teledetección pasiva ópticas, técnicas en las cuales el sensor es capaz únicamente de captar los rayos electromagnéticos emitidos por elementos del terreno, por ejemplo al ser iluminados por la luz solar. Más información sobre teledetección en [18, 19, 20, 21 y 22].

Por lo tanto, el sistema se basa en emitir una señal de ondas electromagnéticas generado por el sensor (microondas al tratarse de radar) y recoger el eco reflejado sobre un objeto de interés, en nuestro caso una porción de terreno.

Típicamente se han estado empleando sistemas SAR con sensores embarcados en satélites, que toman imágenes SAR de la superficie terrestre periódicamente, estando por lo tanto condicionados por la órbita y características de los satélites. Una ventaja del GB-SAR frente a dichos sistemas es que disponemos de un equipo mucho más flexible, donde las imágenes las tomamos nosotros para cada caso particular.

No obstante el GB-SAR es aplicable en parcelas reducidas de terreno (pocos kilómetros de extensión), frente a los sistemas SAR con sensores embarcados en satélites [23, 24, 25 y 26] y que abarcan en cada captura porciones de hasta 100x100km de extensión. La precisión de los sistemas terrestres es habitualmente mayor que en los sistemas por satélite por el hecho de ser más locales y tener influencia de menos errores.

3.1. FUNDAMENTOS DEL GB-SAR

Las técnicas SAR (*Synthetic Aperture Radar*) se pueden definir como la composición de dos técnicas diferentes: la técnica Radar que principalmente mide distancias y la ‘apertura sintética’, que permite al Radar discernir objetos que se encuentran a la misma distancia respecto de este. El objetivo final de dicha composición es la de obtener una imagen Radar bidimensional de una cierta parcela del terreno, dónde conoceremos la fase y la amplitud de cada píxel de la misma.

Dicha técnica es conocida habitualmente como *Imaging Radar* [27], donde a parte de obtener información en distancia de los elementos del terreno seremos capaces de componer imágenes bidimensionales.

3.1.1. Fundamentos del Radar

Radar son las siglas de *Radio Detection And Ranging*. Las ondas de radio o microondas son ondas electromagnéticas de longitudes de onda comprendidas entre 1 mm y 1 metro.

El funcionamiento del Radar consiste en enviar ondas volumétricas de una determinada longitud de onda, amplitud y frecuencia. El sensor envía las señales sobre una superficie amplia del terreno (cono de proyección desde el sensor al terreno, figura 28) y tras darse la reflexión las ondas vuelven de nuevo al sensor y son recogidas por la antena receptora, que registra la fase y la amplitud de la onda reflejada o eco. El sensor al que nos referimos posee dos antenas, una de emisión y otra de recepción.

Más información sobre los principios del radar pueden hallarse en [28, 29 y 30].

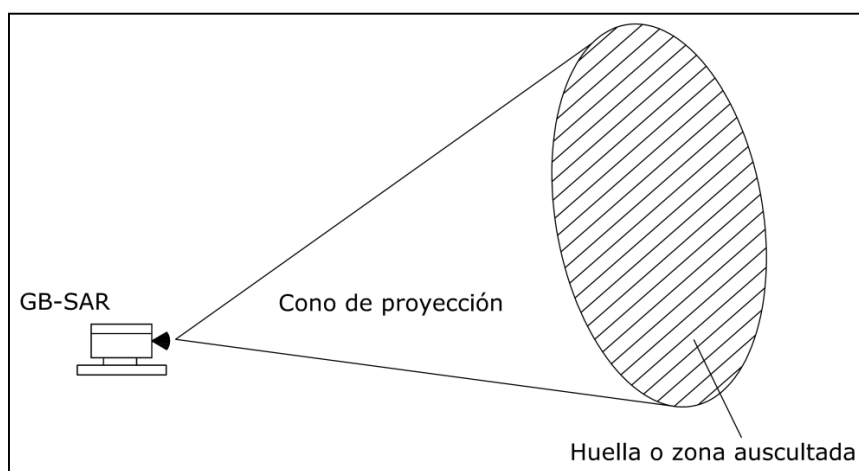


Figura 28. Técnica de Imaging Radar para la obtención de imágenes bidimensionales de superficies amplias de terreno empleando técnicas de radar GB-SAR.

Mediante las técnicas Radar únicamente somos capaces de discernir objetos situados a distancias diferentes, dado que los objetos situados a una misma distancia devuelven una respuesta acumulada, no pudiéndose obtener imágenes bidimensionales (figura 29) [27]. Llamaremos *range* a la dirección en la que se propagan las ondas o pulsos electromagnéticos, tal y como se describe en los siguientes apartados.

La resolución en distancia o *range resolution* es la distancia mínima a la que dos diferentes blancos de misma luminosidad pueden ser unívocamente discernidos como señales diferentes [27]. Nos dará el tamaño del píxel en dirección a la propagación de las ondas (figura 30.a). Depende de las características propias del radar y su configuración, concretamente de su ancho de banda B:

$$\Delta R \approx \frac{c}{2B}$$

Por ello la resolución en *range* es constante en distancia desde el sensor (figura 30.a.). En el caso del equipo empleado en Vallcebre el tamaño de píxel en *range* es de 0,5 metros.

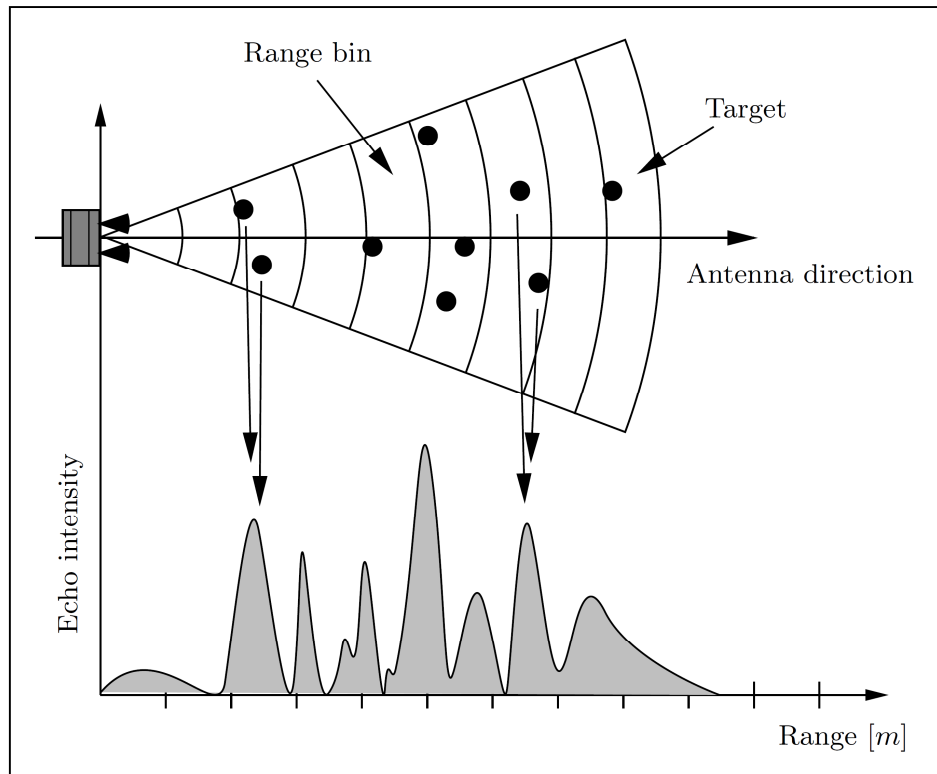


Figura 29. Medidas en range iluminando diferentes blancos (targets). Los blancos situados a la misma distancia devuelven una respuesta acumulada. No es posible por lo tanto distinguir entre diferentes blancos que se encuentren en el mismo píxel en distancia [27].

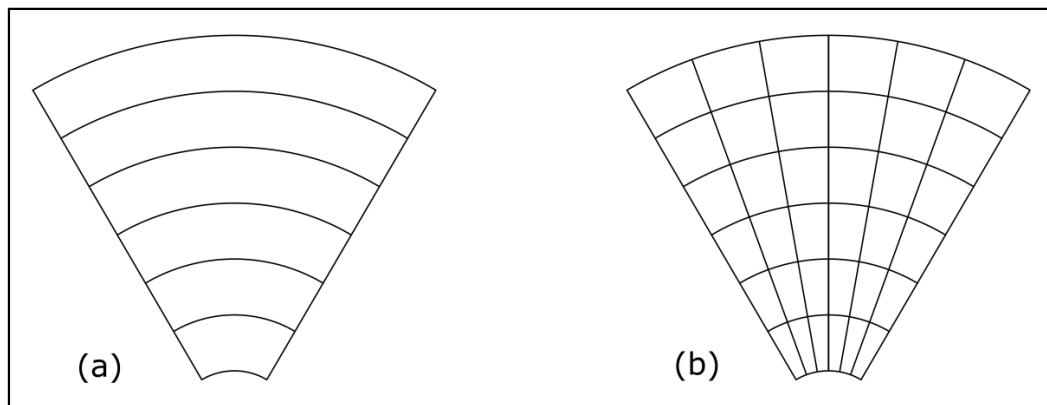


Figura 30. (a) Range resolution. (b) Range resolution y cross-range resolution.

3.1.2. Apertura Sintética

Como se ha introducido en el apartado anterior, mediante técnicas Radar no es posible discernir elementos diferentes que se encuentren a una misma distancia desde el sensor, dado que éstos devuelven una respuesta acumulada tras su reflexión sobre el blanco. Para poder conseguir discernirlos y de este modo obtener imágenes bidimensionales será necesario emplear la técnica de 'apertura sintética' sumada a la técnica Radar ya descrita.

La técnica de ‘apertura sintética’ consiste en combinar imágenes o perfiles Radar de una misma escena observada desde puntos de vista sensiblemente diferentes; en el caso del GB-SAR conseguimos dichos perfiles desplazando el sensor a lo largo de un rail cuya longitud será la longitud de la antena sintética. Ello nos permitirá discernir los objetos que se encuentran a una misma distancia y situarlos en el espacio, para poder finalmente componer una imagen Radar bidimensional.

Llamaremos *azimuth* a la dirección en la que se desplaza el sensor a lo largo de la captura de una imagen SAR.

La resolución en *azimuth* o *cross-range resolution* (figura 30.b) se define como una resolución angular que depende de la longitud del raíl (o longitud de la antena sintética) y de la longitud de onda, según la siguiente expresión:

$$\Delta\varphi \approx \lambda/(2L)$$

Al tratarse de una resolución angular, el tamaño del píxel crece linealmente en distancia (figura 30.b). Como se aprecia, a más longitud de antena sintética, menor será $\Delta\varphi$, y por lo tanto mayor resolución: la resolución en *azimuth* es directamente proporcional a la longitud del rail.

3.1.3. Adquisición de Imágenes con GB-SAR

El GB-SAR empleado en el proyecto de Vallcebre es un sensor radar llamado IBIS-L (*Image By Interferometric Survey – L*). Las características del radar se muestran en la tabla 6.

Frequency band	Ku-band, 17 GHz
Wavelength	1,8 cm
Maximum range	4,0 km
Spatial resolution	Max resolution; range: 0,5 m, cross-range: 4,4 mrad.
Power supply	Batteries or 12VCD solar cells
Dimensions	250 x 50 x 60 cm (linear scanner)
Weight	170 kg (with power supply)
Processing unit	PC with IBIS-L operational software

Tabla 6. Características del Sistema [27]

El sistema consiste de 4 componentes fundamentales (figura 31):

- Sensor radar y sus antenas receptora y emisora.
- Rail de 2,5 metros de longitud y un motor usado para desplazar el radar paralelamente al escenario observado para de este modo obtener múltiples imágenes de la misma escena desde ángulos de vista ligeramente distintos y poder explotar las técnicas SAR.
- Unidad de control: PC con el software necesario para controlar el sistema radar.
- Unidad de alimentación mediante baterías de automóvil de 12V.



Figura 31. (a) Imagen real del sensor sobre el rail en Vallcebre. El sensor amarillo, montado sobre el rail, se desplaza de izquierda a derecha obteniendo múltiples perfiles radar para poder obtener una imagen SAR en cada pasada. (b) Unidad de control y de alimentación.

Tal y como se ha explicado en los apartados anteriores, para componer una imagen SAR es necesario conocer la posición de los objetos observados en *azimuth*, cosa que podremos conocer a partir de la apertura sintética de la antena Radar, que en el caso de GB-SAR conseguiremos desplazando el sensor a lo largo de un rail, (movimiento de *stop and go*, figura 32), iluminando el área de interés en su trayectoria y tomando un perfil radar de la escena en cada *stop* que realiza a lo largo del recorrido sobre el rail, creando una antena sintética de longitud L (longitud del rail). El equipo empleado en Vallcebre tarda unos 7 minutos en recorrer los 2 metros útiles del rail. Una vez recorrido todo el rail podemos obtener una imagen SAR.

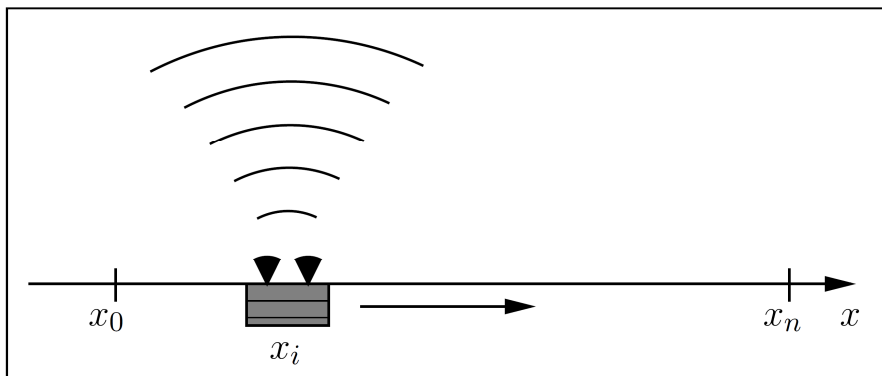


Figura 32. El sensor se desplaza a lo largo del rail desde x_0 hasta x_n adquiriendo medidas en range de la misma escena desde diferentes posiciones. Esto permite focalizar las medidas range en una sola imagen empleando las técnicas SAR [27].

Finalmente tenemos múltiples perfiles Radar de la misma escena tomados desde cada *stop* del sensor en su movimiento a lo largo del rail, es decir, información de los mismos elementos pero desde puntos de vista sensiblemente diferentes. De este modo podemos conocer la distancia en *azimuth* entre los diversos elementos situados a un mismo *range* y situarlos en el espacio, obteniendo finalmente una sola imagen bidimensional, a la que llamamos imagen SAR. Por lo tanto cada imagen SAR se obtiene de la combinación píxel a píxel de todos los perfiles Radar tomados en una misma “pasada” del sensor sobre el rail.

Una de las características más importantes de este sensor es que se trata de un sistema coherente: proporciona la amplitud y la fase de la señal Radar en la dirección LOS (*Line Of Sight*), es decir, en la dirección entre el sensor y el punto de la superficie estudiado en cada caso [31, 32 y 33].

3.1.3.1. Características de la medida

Como se ha descrito en el apartado anterior, las observaciones SAR están basadas en observar la “misma” escena desde ángulos ligeramente diferentes durante un lapso de tiempo muy pequeño (minutos en GB-SAR). El total de perfiles radar obtenidas a lo largo de este lapso de tiempo, moviendo ligeramente el sensor a lo largo del rail, nos proporcionará finalmente una imagen SAR, en el que cada píxel contendrá información de la fase y de la amplitud a partir de un número complejo asociado a cada píxel de la imagen (módulo la amplitud y argumento la fase: $I = A \times e^{j\phi}$), del cual se deriva a posteriori una imagen que represente la amplitud y otra que represente la fase (figuras 33 y 36(a) respectivamente). La fase guarda relación con la longitud recorrida por el pulso, y también con otros factores de los cuales hablaremos más adelante (atmósfera y ruido), mientras que la amplitud nos da información sobre la potencia de la señal reflejada por el terreno, por lo que es una buena herramienta para localizar elementos en la imagen.

Tal y como se ha comentado, a mayor longitud de antena sintética, mayor resolución en *azimuth*. Pero una mayor longitud de la antena sintética o del rail producirá que la toma de la imagen SAR sea más lenta, cosa que puede producir cambios en la escena observada y que nos llevaría a distorsiones en la imagen SAR final. Estos cambios en la escena pueden ser producidos no únicamente por movimientos, sino también por cambios de tipo atmosférico, que en determinadas horas del día pueden ser rápidos, o bien por cambios en el comportamiento del blanco (por ejemplo al variar su reflectividad), algo que suele ocurrir por ejemplo en escenarios vegetados o al variar la humedad de la superficie del blanco. Por ello conviene que el lapso de tiempo destinado a obtener una imagen SAR sea lo más pequeño posible: el escenario ha de mantenerse ‘inmóvil’ a lo largo de la toma de cada imagen SAR.

Hay que tener presente que dichas ondas atraviesan la atmósfera, por lo que las ondas se verán afectadas por el medio, produciéndose un retraso de las mismas en su propagación [34 y 35]. A estos efectos les llamaremos “*artefactos atmosféricos*”. Las ondas Radar tienen además la ventaja de ser menos sensibles (más estables) a las condiciones atmosféricas que los sensores ópticos.

La fase registrada se corresponde a una fracción de ciclo, quedando una ambigüedad de ciclos enteros entre el sensor y el punto de reflexión: desconocemos el número entero de ciclos entre el sensor y el blanco. Sin entrar más detalles, la fase de cada imagen SAR puede expresarse como [27]:

$$\phi = \phi_{dist} + \phi_{atmos} + \phi_{ruido} = \phi_{2K\pi} + \phi_{x\pi} + \phi_{atmos} + \phi_{ruido}$$

Donde:

- ϕ_{dist} es la fase debida a la distancia real entre el sensor y el blanco.
- $\phi_{2K\pi}$ es la fase debida a la distancia real entre el sensor y el blanco considerando únicamente el número de ciclos enteros (K) en el recorrido de ida y vuelta.
- $\phi_{x\pi}$ es la fase debida a la distancia real entre el sensor y el blanco considerando únicamente la fracción de ciclo medida en el recorrido de ida y vuelta.
- ϕ_{atmos} es el término de fase debido al efecto atmosférico (*artefactos atmosféricos*)
- ϕ_{ruido} es el término de fase debido al ruido inherente al sistema.

Se deduce que con una sola imagen SAR no es posible calcular desplazamientos. Para ello necesitamos dos o más imágenes suficientemente espaciadas en el tiempo y que diferenciaremos mediante técnicas interferométricas para obtener finalmente el desplazamiento que se ha producido entre ellas (apartado siguiente).

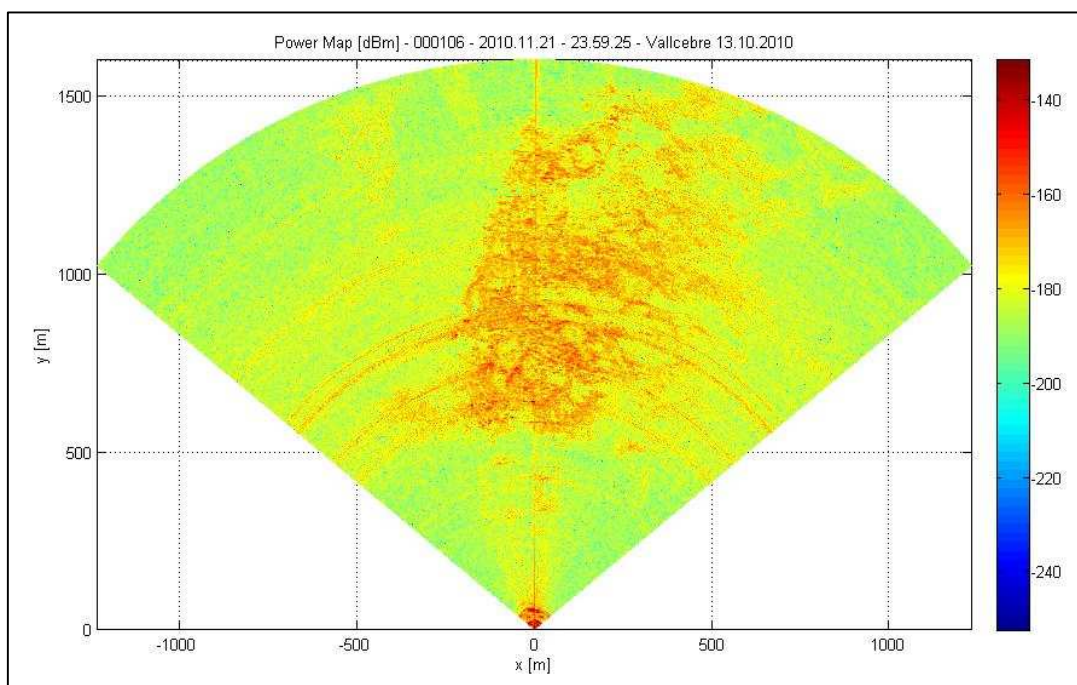


Figura 33. Imagen de la amplitud de una imagen de GB-SAR. Las píxeles rojos representan ecos reflejados de alta potencia, lo que significa que una gran porción de la energía transmitida vuelve reflejada al sensor. Los puntos de alta potencia de reflexión son típicamente aquellos puntos que podremos explotar (más coherentes en fase y amplitud) [27].

3.2. INTERFEROMETRÍA SAR (InSAR)

La técnica interferométrica InSAR consiste en procesar los datos de cómo mínimo dos imágenes SAR que cubren la misma área. Concretamente comparamos la fase de dos imágenes SAR tomadas en dos momentos diferentes (que llamamos *master* y *slave*, figura 34), píxel a píxel, haciendo la diferencia de fase entre ellas. Por lo tanto interesa contar con adquisiciones con cierta separación temporal para poder detectar movimiento.

En interferometría es habitual trabajar con longitudes de onda lo más pequeñas posibles, ya que obtendremos precisiones mejores en la estimación de movimientos, pero por otro lado las ondas cortas son más sensibles en su propagación por el medio, por lo que es necesario cierto equilibrio. Las bandas más habituales son la banda X ($\lambda \sim 2,5$ to $3,75$ cm), la banda Ku ($\lambda \sim 1,66$ to $2,5$ cm) y la banda K ($\lambda \sim 1,11$ to $1,66$ cm).

Sin dar más detalles, considerando nulo $\Delta\phi_{ruido}$ por ser similares en ambas imágenes SAR y por ser un valor muy pequeño, el diferencial de fase resultado que se obtiene entre imágenes SAR es:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{x\pi} + \Delta\phi_{2K\pi} + \Delta\phi_{atm}$$

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = (\phi_{x_2\pi} - \phi_{x_1\pi}) + (\phi_{2K_2\pi} - \phi_{2K_1\pi}) + (\phi_{atm2} - \phi_{atm1})$$

El desplazamiento real en términos de fase se corresponde con la mitad del primer término de la expresión:

$$\Delta\phi_{x\pi} = (\phi_{x_2\pi} - \phi_{x_1\pi}) = 2 \cdot \phi_{mov}$$

Es decir, la mitad de la diferencia de la fracción de ciclo entre ambas imágenes se corresponde con el desplazamiento. Además, para que la técnica funcione estamos asumiendo pequeños desplazamientos, concretamente que el segundo término de la expresión se anule, $(\phi_{2K_2\pi} - \phi_{2K_1\pi}) = 0$, es decir, que el número de ciclos enteros recorrido por la señal sea el mismo en ambas tomas de datos ($K_1 = K_2$). De lo contrario, tendremos problemas de *aliasing* o de “*enrollamiento de fase*” [25].

El hecho de que la técnica imponga pequeños movimientos, implica que si el movimiento entre dos imágenes SAR es superior a la mitad de la longitud de onda, tendremos problemas de “*enrollamiento de fase*” (*phase unwrapping* o *aliasing*) [25]: ambigüedad en la medida de desplazamientos al saltar un ciclo. Por ejemplo, si una determinada zona ha tenido un movimiento real de 1,2 cm y tenemos una longitud de onda de 1,8 cm, tendremos como resultado un movimiento de 0,3 cm, es decir, medio ciclo menor al real. Dicho de otro modo, para que el sistema funcione, el número entero de ciclos entre el sensor y un blanco en un camino de ida y vuelta ha de ser el mismo entre dos imágenes consecutivas, siendo diferente únicamente la fracción de ciclo $\Delta\phi_{x\pi}$, que será la que determine el desplazamiento. Además, el desplazamiento máximo que podemos medir es $\frac{1}{2}$ de la longitud de onda con la que estamos trabajando.

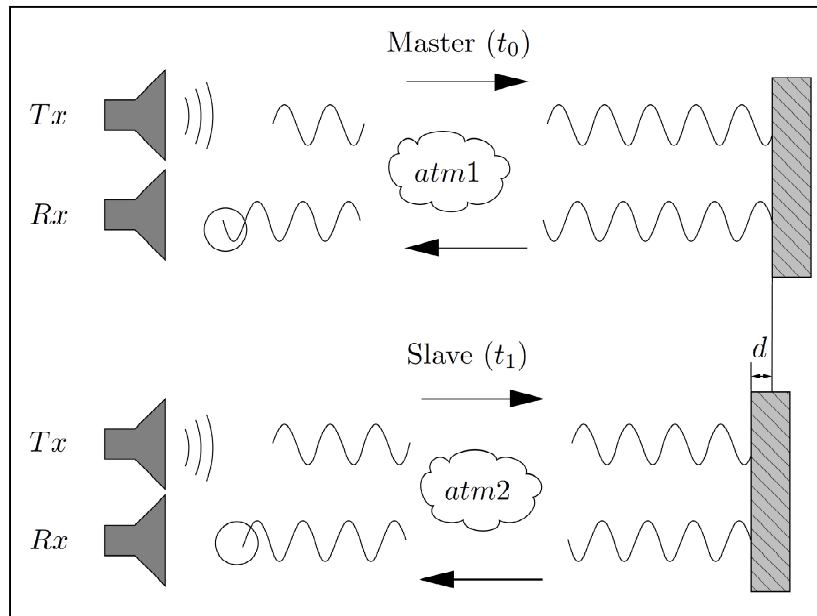


Figura 34. Desplazamiento entre dos imágenes SAR (master y slave), cada una de ellas afectada por un estado atmosférico diferente (atm1 y atm2) [32].

Finalmente la componente $\Delta\phi_{atm} = \phi_{atm2} - \phi_{atm1}$ puede representar una fuente muy importante de error [34]. Los efectos atmosféricos afectan directamente sobre las ondas Radar que se propagan entre el sensor y el blanco, produciéndose un efecto de retardo variable sobre las mismas. Las imágenes no adquiridas al mismo tiempo pueden haber sido tomadas en condiciones atmosféricas diferentes, por lo que el término $\Delta\phi_{atm}$ no será igual a 0.

Es necesario conocer como afecta la atmósfera sobre la fase para cada imagen SAR y para cada píxel de la misma, para lo cual empleamos un modelo atmosférico para cada caso y momento particulares, ajustando una función matemática (lineal o cuadrática) que modele el comportamiento atmosférico en función de la distancia para corregir las imágenes SAR. Conociendo ϕ_{atm1} y ϕ_{atm2} para cada blanco estudiado y en cada imagen podremos eliminar dicho error atmosférico, hallar $(\phi_{x_2\pi} - \phi_{x_1\pi}) = 2 \cdot \phi_{mov}$ y finalmente el desplazamiento:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \phi_{mov}$$

Los efectos atmosféricos que afectan sobre las señales son fundamentalmente la humedad, temperatura del aire y presión atmosférica, por orden de importancia [34 y 35]. En el apartado de *Procesado de las Observaciones y Resultados* de este trabajo se habla detalladamente de la caracterización atmosférica llevada a cabo para poder obtener desplazamientos, un trabajo que he llevado a cabo en el *Institut de Geomàtica* a partir de observaciones tomadas por el mismo. La caracterización atmosférica es uno de los principales problemas en el uso de sistemas GB-SAR en la actualidad, junto con la falta de coherencia y el enrollamiento de fase. Por este motivo es uno de los temas más tratados en el procesado de datos de este trabajo y en el que se hace más hincapié de forma particular.

3.2.1. Selección de píxeles. Concepto de coherencia.

Las técnicas InSAR solo funcionan bajo condiciones de coherencia, donde la respuesta de las ondas para cada píxel estudiado será una medida vital para conocer si la fase es o no explotable. Cuando hablamos de coherencia nos referimos al grado de correlación ente píxeles de imágenes, siendo el criterio estadístico a partir del cual realizamos la selección de píxeles que van a ser objeto de estudio. Existen dos tipos de coherencia: la coherencia espacial y la coherencia temporal.

Podemos definir coherencia espacial como el grado de similitud entre píxeles vecinos de un interferograma: este criterio impone que la respuesta de un píxel debe ser similar a la respuesta de sus píxeles vecinos [25]. En este caso podemos decir que la coherencia es un parámetro estadístico espacial. Por otro lado, en coherencia temporal nos referimos al grado de similitud de un mismo píxel a lo largo de una serie temporal de imágenes SAR adquiridas.

Se trata por lo tanto de un indicador de la calidad de fase interferométrica de una imagen o entre imágenes consecutivas, cosa que incide directamente sobre la calidad de los datos obtenidos, y por tanto de los resultados finales (en este caso desplazamientos). Un trabajo con una coherencia elevada será aquel que pueda darnos resultados de calidad. La coherencia se define mediante una expresión matemática [23, 24, 25, 27 y 30] y se obtienen resultados entre 0 y 1, donde los valores más elevados corresponden a coherencias elevadas (figuras 35 y 36 (b)).

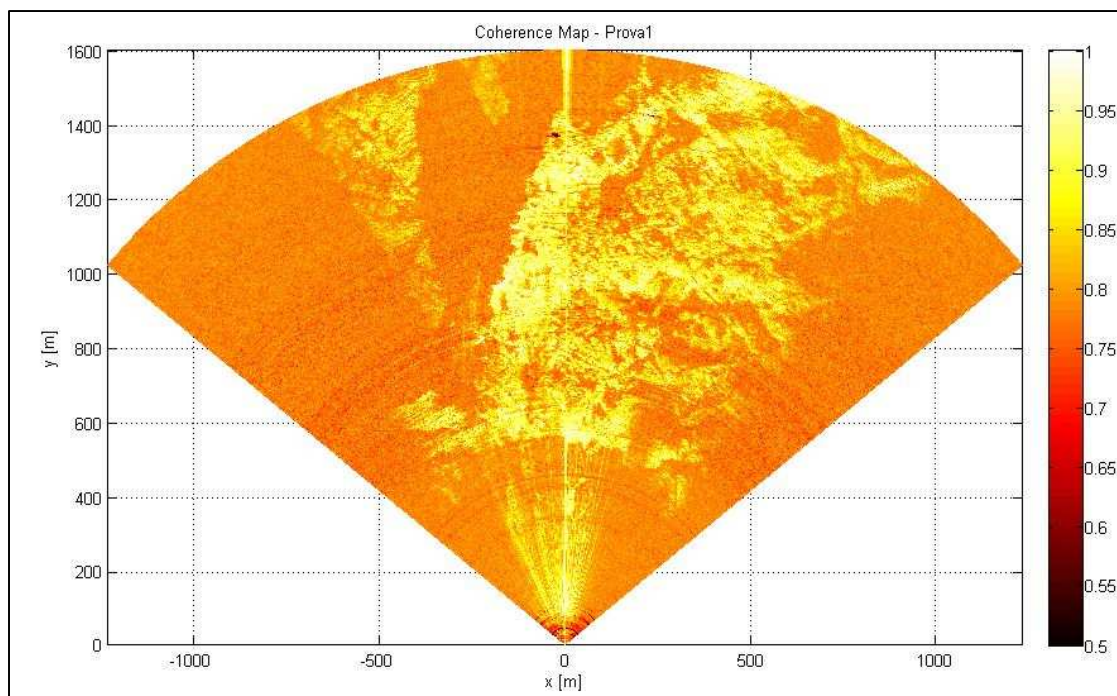


Figura 35. Mapa de coherencia de una imagen radar. Muestra la coherencia de una escena a lo largo del tiempo, con valores entre 0,5 y 1, donde los valores más elevados corresponden a píxeles con mayor coherencia. Fuente: Institut de Geomàtica.

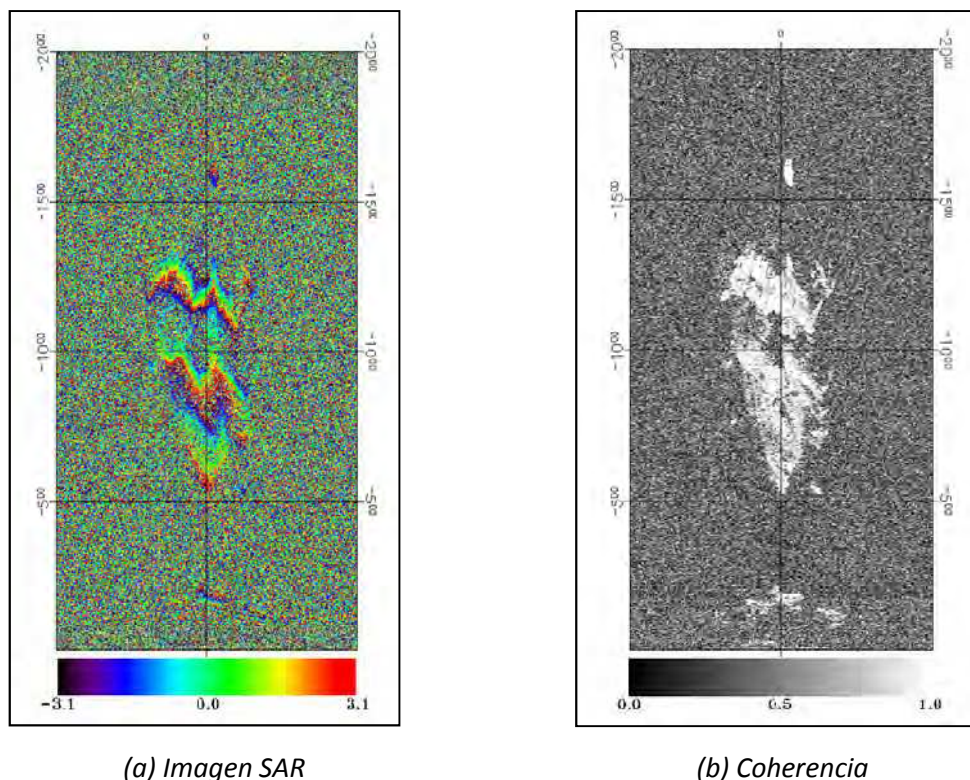


Figura 36. (a) Imagen SAR. Se codifica mediante el incremento de fase registrada, que como sabemos se encuentra en el intervalo $[0, \lambda]$, o lo que es lo mismo $[-\lambda/2, \lambda/2]$. En términos de fase el registro es angular y se expresa en el intervalo $[-\pi, \pi]$. (b) Imagen que muestra la coherencia de la misma escena. Los píxeles brillantes son los más coherentes [27].

La coherencia se pierde con el tiempo debido a cambios en la escena observada. El material, forma y rugosidad de los blancos afectan fuertemente sobre la misma. Zonas vegetadas nos llevarán a coherencias bajas dada su naturaleza entrópica, mientras que materiales sólidos como rocas o estructuras mantienen una coherencia elevada para largos períodos de tiempo [27]. Resulta paradójico medir desplazamientos con una técnica que impone que no deben existir desplazamientos entre imágenes consecutivas para obtener una coherencia máxima.

En las imágenes SAR que se emplean para el procesado, la calidad de fase varía de un punto a otro y no todos los puntos presentan la calidad suficiente como para sernos útiles para la estimación del movimiento. Es por esto que lo primero que se realiza es la selección de los puntos mayor calidad por tal de quedarnos con los píxeles correspondientes a los puntos que restan coherentes a lo largo del tiempo. Los puntos que permanecen estables a lo largo del tiempo se conocen como *permanent scatters*: alta coherencia y bajo ruido.

Es habitual llevar a cabo una selección de píxeles según si superan o no una determinada coherencia. Este paso es crucial, ya que cuanto más restrictivos somos escogiendo el umbral mínimo de coherencia más píxeles estaremos descartando, con lo que obtendremos una cantidad menor de resultados, pero siendo los mismos más coherentes. Es por ello que es importante establecer unos límites de coherencia adecuados para evitar tener demasiados pocos puntos muy coherentes o demasiados puntos pero poco coherentes.

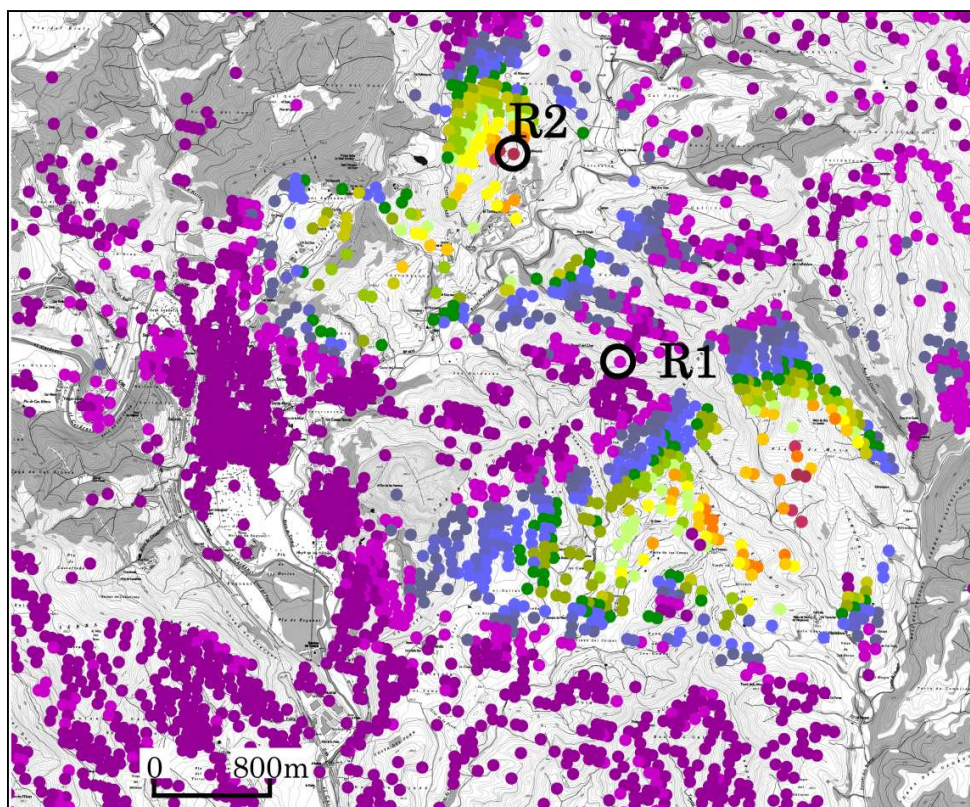


Figura 37. Ejemplo: Resultados procesados con parámetros de coherencia de 0,4 y 0,3. Los puntos de colores más suaves son aquellos que tienen coherencias más bajas, es decir, más próximas a 0,3. Todos los puntos tienen una coherencia de al menos 0,3, pero sólo aquellos más oscuros llegan a coherencias cercanas a 0,4 [24].

Finalmente se obtiene un mapa de puntos que cumplan el umbral mínimo de coherencia exigido (figura 37) y disponemos de la fase de los mismos. Obtendremos los desplazamientos únicamente de estos puntos. Dichos puntos deben aparecer en todas las imágenes SAR por tal de poder diferenciar sus fases y obtener los desplazamientos de los mismos. Existen otros métodos de selección de píxeles más potentes pero siguiendo criterios menos intuitivos [25].

Vemos por lo tanto que existe un compromiso con el nivel de coherencia impuesto, ya que si somos demasiado permisivos se tendrá una gran cantidad de resultados pero con valores poco fiables, pero si somos demasiado restrictivos tendremos unos resultados mejores pero tal vez una cantidad insuficiente (pérdida de resolución espacial).

3.2.1.1. Empleo de Corner Reflectors

Como se ha descrito, el InSAR funciona únicamente si existe coherencia. Esto típicamente ocurre en zonas urbanas e industriales, sobre zonas rocosas, etc. mientras que al contrario no ocurre en zonas vegetadas y bosques [32]. Es necesario por lo tanto una buena reflectividad de los elementos observados y que ésta sea estable en el tiempo, es decir, necesitamos una alta relación señal/ruido (figura 38).

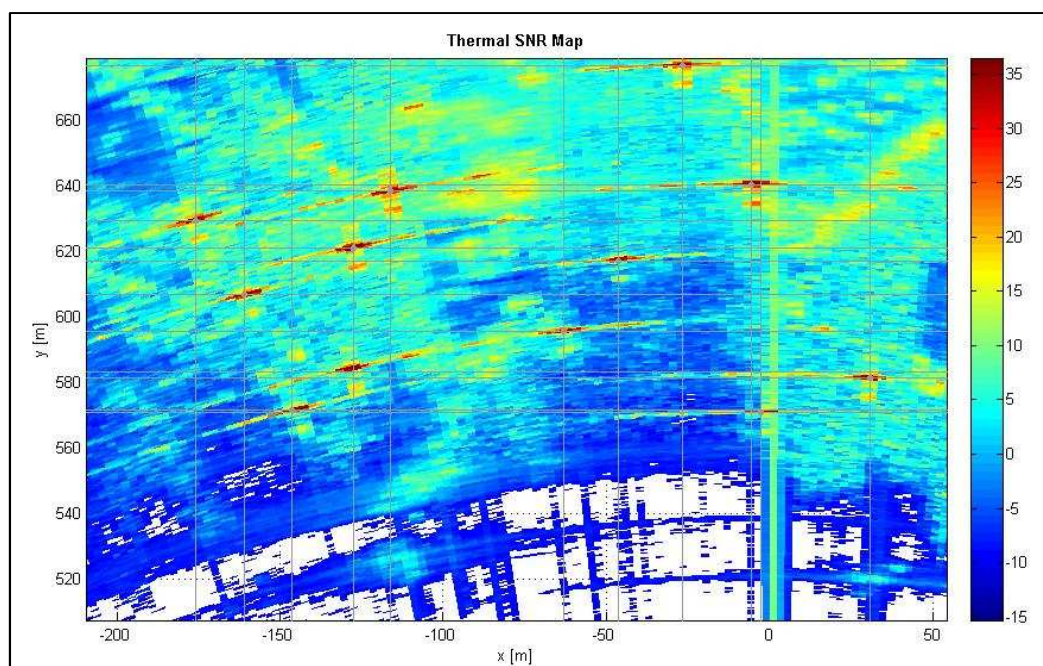


Figura 38. Mapa SNR de una imagen radar (Signal Noise Ratio). Muestra la relación señal/ruido de una escena a lo largo del tiempo, es decir, el margen que hay entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe. SNR elevados indican ruido bajo.

Fuente: Institut de Geomàtica.

El estudio de escenarios vegetados, como es el caso de estudio (ladera inestable de Vallcebre), es especialmente complicado ya que es imposible o casi imposible obtener imágenes con una coherencia adecuada para su procesado (fuerte decorrelación entre imágenes; baja coherencia). Por este motivo es necesaria la colocación de elementos sobre el terreno que tengan una buena respuesta, es decir, que tengan buena reflexión y que además la fase sea estable en el tiempo, con el objetivo de poder disponer de píxeles coherentes en largos intervalos, pudiéndose estimar con gran precisión los movimientos de dichos píxeles coherentes una vez *cancelados* los artefactos atmosféricos.

Para ello instalamos sobre el terreno elementos conocidos como *Corner Reflectors* (figura 39) [32 y 36]. Se tratan de triedros metálicos que funcionan como reflectores ideales, y que complementarán aquellos reflectores naturales si los hay. Estos elementos nos proporcionarán los píxeles coherentes necesarios sobre los cuales calcularemos los desplazamientos.

Las técnicas que se basan en la detección de *corner reflectors* constituyen una variante avanzada de la Interferometría SAR en la que sólo se estudian los blancos puntuales de la imagen cuya fase se mantiene estable en el tiempo de estudio. Estos elementos se instalan en cada nueva campaña y deben ser reposicionados y orientados correctamente para poder recibir y reflejar eficazmente la señal que recibe desde el sensor [36]. Es por ello una técnica costosa y que requiere una inversión importante en la fabricación, colocación y orientación de dichos elementos reflectores en cada campaña.

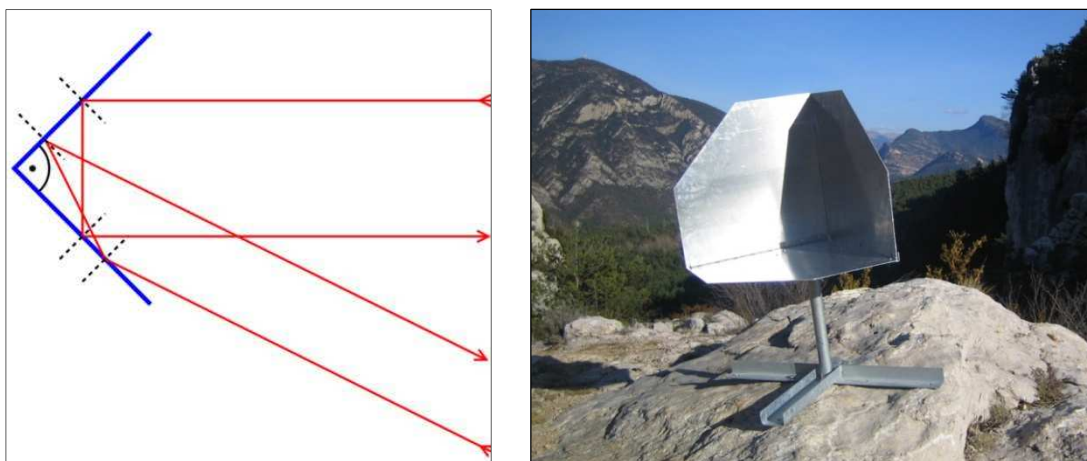


Figura 39. (a) Principio de funcionamiento de un corner reflector. (b) Corner reflector real instalado en Vallcebre.

3.3. APLICACIONES DEL GB-SAR

Algunas de las aplicaciones más relevantes del DInSAR para la medida de desplazamientos [32] son: medida de deformaciones en áreas urbanas [38, 39, 40 y 41]; en zonas afectadas por terremotos [42 y 43]; en zonas volcánicas [44 y 45]; en movimientos de glaciares [46, 47 y 47b]; y en movimientos de ladera (con *corner reflectors*) [17, 19, 48, 49, 50 y 51].

En este trabajo nos centramos fundamentalmente en la medida y monitorización de deformaciones asociadas a movimientos de ladera, particularizando en el caso de Vallcebre. Estas zonas son por definición zonas muy vegetadas, por lo que será difícil encontrar blancos que ofrezcan una fase interferométrica estable (reflectores naturales), y por lo tanto, es necesaria la instalación de reflectores artificiales o *corner reflectors*. Cabe destacar que la instalación de estos elementos es costosa, debido al número de *corners* necesarios en cada escenario y su debido transporte y orientación necesaria antes de efectuar cada medida SAR.

Existen dos modalidades posibles de observación GB-SAR:

- a) **Campañas puntuales:** capturamos diversas imágenes SAR durante un período corto de tiempo (por ejemplo una hora) y no volvemos a medir hasta que el terreno se haya desplazado lo suficiente, por ejemplo dos meses más tarde. De este modo obtenemos imágenes SAR en dos momentos separados en el tiempo y diferenciando entre dichas imágenes hallaremos el desplazamiento en la LOS que se ha producido en el lapso de tiempo comprendido entre la adquisición de ambas imágenes.
- b) **Campañas en continuo:** capturamos imágenes SAR ininterrumpidamente a lo largo de un largo período de tiempo, por ejemplo una semana, obteniendo cientos o incluso miles de imágenes SAR del mismo escenario. Podemos obtener desplazamientos diferenciando entre imágenes del inicio y del final de la campaña. Además, podemos obtener aceleraciones y deceleraciones de dichos movimientos: permite la monitorización de desplazamientos en continuo.

Hay que tener especial cuidado en la interpretación y análisis de los datos, dado que las deformaciones se obtienen en dirección de la LOS (*Line of Sight*), es decir, en la dirección entre el sensor y el blanco o punto estudiado en cada caso.

3.4. COMPENDIO FOTOGRÁFICO

A lo largo del trabajo he realizado diversas salidas a la ladera de Vallcebre durante las campañas de medición que estaba efectuando el *Institut de Geomàtica*. A continuación se muestran diversas fotografías tomadas a lo largo de dichas campañas.



Figura 40. GB-SAR en funcionamiento instalado en Vallcebre, en la que se aprecia la ladera monitorizada. Diciembre de 2010.



Figura 41. Sensor GB-SAR desplazándose a lo largo del rail en Vallcebre. Se puede apreciar el trípode de una estación total situada detrás del rail. Diciembre de 2010.



Figura 42. En esta fotografía se aprecia el sensor GB-SAR con sus dos antenas, emisora y receptora (izquierda y derecha respectivamente). Diciembre de 2010.



Figura 43. GB-SAR trabajando de noche en Vallcebre. Se aprecia el sensor desplazándose a lo largo del rail, la unidad de alimentación y la unidad de control. Enero de 2011.



Figura 44. Corner reflector instalado en Vallcebre. Enero de 2011.



Figura 45. Corner reflector instalado en Canillo (Andorra). Noviembre de 2010.

4. SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO POR SATÉLITE (GNSS)

4.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos 20 años el uso de técnicas basadas en GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) se ha ido generalizando en todo tipo de mediciones en superficie, reemplazando en gran medida a las técnicas de topografía clásica.

Los sistemas GNSS son sistemas de posicionamiento global, radionavegación y medida de tiempo basado en la medición de distancias entre satélites y receptores situados sobre la superficie terrestre.



Figura 47. Satélite de la constelación GPS-NAVSTAR orbitando alrededor de la Tierra [52].

Estos sistemas empezaron a desarrollarse a finales de los años 70 y reemplazaron a los sistemas existentes en el momento, el TRANSIT estadounidense y TKSADA soviético, sistemas que se basaban en mediciones Doppler sobre dichas constelaciones, formadas por 6 satélites de órbita baja (unos 1000 km sobre la superficie). Los sistemas actuales ofrecen mejor cobertura y mayor precisión en el cálculo de posiciones y de posiciones relativas de receptores situados sobre la superficie terrestre [52].

Las dos constelaciones GNSS operativas en la actualidad son la GPS-NAVSTAR estadounidense (*NAVigation Satellite with Time And Ranging*) desde 1994 y la GLONASS rusa (*GLObal NAVigation Satellite System*) desde 2010. Existen otras constelaciones de satélites para navegación y posicionamiento que se encuentran en desarrollo en la actualidad, como el COMPASS chino o GALILEO impulsado por la Unión Europea.

La constelación NAVSTAR cuenta con 31 satélites operativos a fecha de marzo de 2011 [54] y la constelación GLONASS cuenta con 27 [53]. En la actualidad se emplean receptores capaces de

aprovechar la señal de ambas constelaciones para obtener una solución única. La combinación de GPS y GLONASS para obtener una solución única es un problema dadas las diferencias entre ambos: sistemas de referencia espacial y temporal, naturaleza de las señales, fase de emisión de señales, etc. Dicha problemática y su solución se estudia detalladamente en [52 y 55].

Una vez superada la problemática de la combinación de observables podemos llegar a soluciones de mayor calidad y más robustas dado que trabajar con dos constelaciones nos proporciona:

- Mayor número de satélites para observar; hasta el doble con ambas constelaciones completas (58 a marzo de 2011).
- Zonas de poca visibilidad tienen más probabilidad de captar satélites.
- Mejor distribución de satélites observados por el hecho de haber más cantidad y especialmente por el hecho de estar distribuidos en un mayor número de planos orbitales; mejor Dilución de la Precisión (*DOP*), es decir, mejor geometría (figura 48).

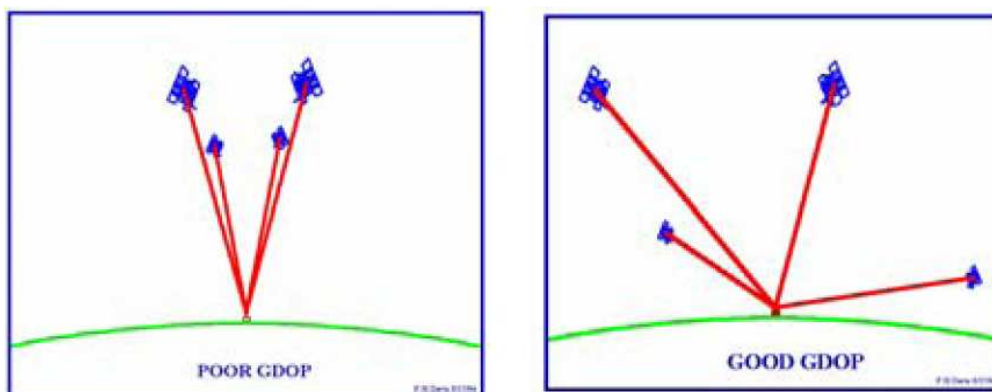


Figura 48. Ejemplo de una mala geometría o bajo índice DOP (izquierda) y una buena geometría o alto índice DOP (derecha) [56]

Las aplicaciones de estos sistemas son múltiples según la técnica que empleemos: soluciones de código o soluciones diferenciales de fase. En estas últimas podemos detallar que existen dos modalidades: soluciones en estático y soluciones RTK (*Real Time Kinematic*), tal y como se describe en los apartados siguientes.

En los siguientes apartados se describen las ideas básicas para comprender los métodos de monitorización mediante GPS.

4.2. ARQUITECTURA DE LOS SISTEMAS GNSS Y FUENTES DE ERROR

Podemos descomponer la arquitectura de un sistema GNSS en tres segmentos diferenciados:

- **Segmento espacial:** satélites que se encuentran en órbita alrededor de la Tierra. Éstos solo emiten señales a los receptores, no las reciben. Tan solo reciben información de las estaciones que los controlan para su buen funcionamiento (figura 49).

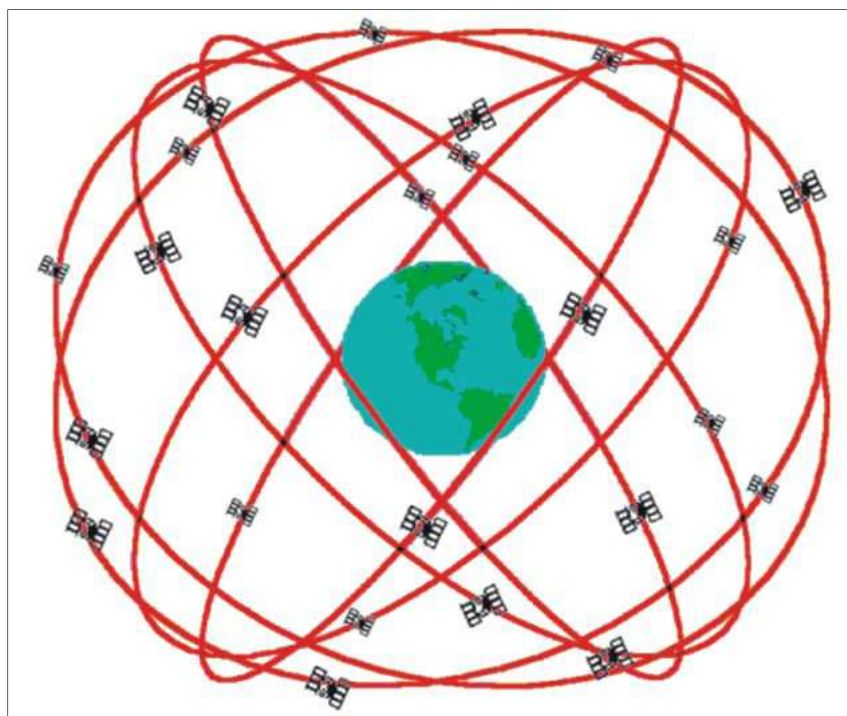


Figura 49. Satélites GPS orbitando alrededor de la Tierra [57]

- **Segmento de control:** Se refiere a las estaciones que hay en Tierra, desde las cuales se controlan todos los satélites GPS; en este caso si existe un flujo de información bidireccional entre las estaciones de control y los satélites. Estas estaciones se encuentran distribuidas por todo el mundo en puntos lo más cercanos posibles al ecuador, normalmente en estaciones militares de EEUU. Las coordenadas de dichas estaciones son conocidas: son los 5 puntos básicos en los cuales se basa el sistema GPS. Gestionan el sistema y calculan coordenadas de los satélites a partir de ellas.
- **Segmento usuario:** Los usuarios reciben información del satélite (no envían ninguna señal al mismo) y calculan soluciones a partir de dichas señales: los relojes coordinados que tienen cada una de las partes y de la señal que modula cada una de ellas. Un receptor está formado por una antena, un receptor (reloj, oscilador, etc.), controladora, unidad de almacenamiento, alimentación y otros sistemas de comunicación (antenas radio para la emisión de correcciones en RTK, comunicaciones GPRS, etc.).

Las **fuentes de error** están localizadas en tres lugares (figura 50):

- **Localizados en los satélites:** efemérides que proporcionan la situación del satélite con un error de unos 10-20 metros, deriva en la base de tiempo del reloj del satélite (muy pequeña) y la SA o *Selective Availability*, error introducido expresamente para evitar que los no autorizados tuviesen una buena precisión de posicionamiento, pero que actualmente se encuentra desactivada.

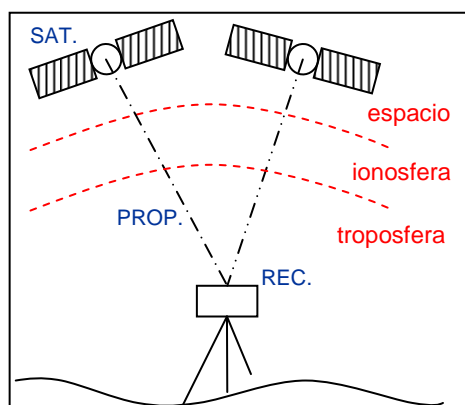


Figura 50. Fuentes de error en sistemas GNSS.

- **En la propagación de las señales:** la señal atraviesa la ionosfera y la troposfera. Ésta última no es un gran problema dado que existen modelos troposféricos que funcionan muy bien para ángulos de elevación de satélites mayores a 10-15°. La ionosfera es un medio dispersivo (electrones, iones libres...) que tiene un comportamiento muy variable, especialmente al ser expuesta a los rayos solares y para la que no se pueden prever modelos generalistas. Es la principal fuente de error en el sistema después de la SA. Aún así, es posible modelarla en tiempo real a partir de la observación de las dos señales que se reciben de cada satélite (dos fases L1 y L2, ver apartados siguientes). El retardo o avance que produce la ionosfera sobre las señales es proporcional a la frecuencia de las mismas, de modo que observando dos frecuencias L1 y L2 diferentes, podemos determinar como afecta la ionosfera según el retardo entre ambas y por lo tanto modelarla a nivel local y en tiempo real para nuestras observaciones. Esto solo es posible con receptores bifrecuencia (habitualmente receptores geodésicos).
- **Localizados en el receptor:** en el reloj del receptor, que aunque los relojes tienen una elevada calidad (relojes de cuarzo termoestabilizados), no tienen una base de tiempo ni tan estable ni tan precisa como un reloj atómico de un satélite (precisión 10E-6 versus 10E-13 de un reloj atómico de cesio). Asimismo existe una indeterminación del centro de fase de las antenas, punto desde el cual se calcula la solución y que por lo tanto habrá que conocer muy bien, pero que varía según el ángulo de incidencia de las señales (elevación del satélite) y según la frecuencia observada (diferente para L1 y L2), por lo que resulta difícil modelar esta fuente de error. También el ruido que genera el propio receptor es una fuente de error. Finalmente el error de multipath o error de rebote de la señal en el entorno del receptor, que produce que las ondas estén retardadas (mayor trayectoria) y atenuadas. Hay que recordar que las observaciones GNSS se basan en la observación de señales directamente satélite-receptor, de modo que las señales rebotadas son una fuente importante de error que es importante evitar, por ejemplo empleando máscaras de elevación de 10-15° para no emplear las señales de satélites de baja elevación o bien seleccionando el lugar adecuado de observación, evitando entornos con muchos obstáculos de visibilidad. También podemos aumentar el tiempo de observación o emplear antenas geodésicas que absorben las ondas reflejadas a partir de *choke rings*.

4.3. COMPARATIVA ENTRE GPS-NAVSTAR Y GLONASS

Ambos sistemas GNSS tienen una arquitectura y un principio de funcionamiento análogo, al igual que los nuevos sistemas que están actualmente en desarrollo (GALILEO, COMPASS, etc).

4.3.1. Características orbitales

Características Orbitales	NAVSTAR – GPS	GLONASS
Número total de satélites mínimo	24 + 3 de repuesto	24 + 3 de repuesto
Planos orbitales	6, espaciados 60º	3, espaciados 120º
Inclinación de los planos orbitales	55º respecto el ecuador	64,8º respecto el ecuador
Satélites por plano orbital	4, no espaciados regularmente	8, espaciados regularmente
Altura orbital	22200km	19100 km
Período orbital	11h 58min	11h 16min

Tabla 7. Características orbitales de ambos sistemas [52]

4.3.2. Sistema de referencia o datum

Los sistemas de referencia utilizados por GPS y GLONASS son diferentes tal y como se muestra en la tabla 8.

	NAVSTAR-GPS	GLONASS
Nombre del datum	WGS84	PZ90
Semieje Mayor Elipsoide	a = 6378138 m	a = 6378136 m
Inversa del Aplanamiento	1/f = 298.257223	1/f = 298.257839

Tabla 8. Características de los datums de ambos sistemas [52]

Por ello, para realizar la combinación de observables será necesario encontrar una transformación que nos relacione las efemérides (información sobre la posición de los satélites enviada por los mismos en el mensaje de navegación) de un sistema a otro, para de ese modo poder trabajar con todos los satélites en el mismo sistema de referencia. Utilizaremos GPS como patrón, de modo que hemos de pasar las efemérides GLONASS de datum PZ90 a WGS84. Los siete parámetros de transformación para llevar a cabo la transformación tridimensional de semejanza (giro tridimensional, translación tridimensional y factor de escala) son conocidos están publicados [52].

4.3.3. Base de tiempo

Hemos de coordinar los relojes entre los satélites y el receptor. El tiempo es una parte fundamental para poder realizar medidas GPS, sean de precisión o no. En el caso de un distanciómetro no hay problema en este aspecto, ya que éste es emisor y receptor, de modo

que tiene un solo reloj. En el caso de GPS hemos de crear un tiempo estable y que éste sea el mismo para los relojes del satélite y el receptor con una elevada precisión.

El principal problema que nos encontramos es precisamente este: la base de tiempo utilizada por ambas constelaciones GPS-NAVSTAR y GLONASS es diferente.

TAI	base de tiempo continua	
UTC	<i>leap seconds</i>	TAI - UTC = <u>33 s</u> (varía)
GPS	Base de tiempo continua	UTC - GPS = <u>-14s</u> (varía) TAI - GPS = <u>19s</u> (constante)
GLONASS	<i>leap seconds</i>	UTC - GLONASS = <u>0s</u> (constante) TAI - GLONASS = <u>33s</u> (varía)

Tabla 9. Relación entre bases de tiempo diferentes [52 y 58]

NAVSTAR emplea el tiempo GPS [58], una base de tiempo continua con un número entero de segundos de desfase respecto del TAI (Tiempo Atómico Internacional), mientras que GLONASS emplea el tiempo GLONASS, una base de tiempo que funciona al ritmo UTC (Tiempo Universal Coordinado), que no es una base de tiempo continua, ya que tiene en cuenta las variaciones que sufre la velocidad de rotación terrestre, de modo que incluye las correcciones de segundos de salto o *leap seconds* que determina el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*). Estas correcciones se introducen sobre el tiempo UTC (nº segundos enteros) para equiparar el tiempo UTC con el “tiempo solar o astronómico”.

Como se describe detalladamente en [52], podemos llegar a conocer la diferencia entre ambas escalas de tiempo con una indeterminación entre ambas relativamente pequeña y que ronda los 200ns en total. Esta cantidad es suficientemente pequeña como para no tenerla en cuenta, puesto que la velocidad de un satélite es de unos 4000 m/s, el satélite en 200 ns se habrá movido 1 mm aproximadamente, de modo que la indeterminación en la posición del satélite a causa de este error es muy pequeño y podemos no tenerlo en consideración a la hora de pasar efemérides de un escala de tiempo a otra. Como vemos se trata nuevamente de transformar efemérides GLONASS a GPS pero en este caso a nivel de escala temporal.

4.3.4. Señales emitidas

Ambas constelaciones emiten dos señales L1 y L2 (banda L), es decir dos ondas sinusoidales simples, sobre las cuales se modulan diferentes códigos que contienen la información necesaria para poder obtener soluciones (tablas 10 y 11).

	Frecuencia	Longitud de onda	Códigos modulados
L1	1575.42 Mhz	19.0425 cm	C/A, P y mensaje de navegación
L2	1227.60 Mhz	24.4379 cm	P y mensaje de navegación

Tabla 10. Señales emitidas por satélites NAVSTAR [52]

	Frecuencias	Longitud de onda	Códigos modulados
L1	1598.063-1605.375 Mhz	18.759-18.674 cm	C/A, P y mensaje de navegación
L2	1242.938-1248.625 Mhz	24.119-24.010 cm	P y mensaje de navegación

Tabla 11. Señales emitidas por satélites GLONASS [52]

Como se aprecia, en NAVSTAR la frecuencia de L1 y L2 es la misma para todos los satélites, pero cada satélite GLONASS transmite dos ondas portadoras L1 y L2 cuya frecuencia varía para cada satélite (figura 51). De hecho en GLONASS los satélites se identifican mediante la frecuencia a la que emiten sus señales, mientras que en GPS-NAVSTAR los satélites se distinguen a partir del código que emiten. Ambos sistemas tienen en común que L1 modula el código C/A y el mensaje de navegación y que L2 modula el código P y el mensaje de navegación, aunque en GPS el código P está encriptado y es de uso militar, mientras que en GLONASS es de uso libre.

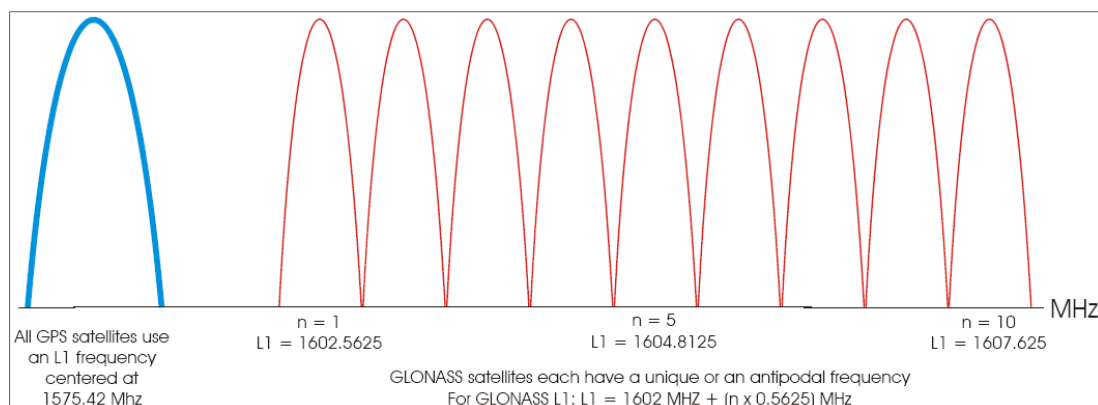


Figura 51. Frecuencias de la portadora L1 para GPS y GLONASS [52].

4.3.5. Códigos modulados

- **Código C/A (Clear/Access):** Es el código que más nos interesa para aplicaciones de navegación civiles. Se trata de un código conocido como PRN (*Pseudo Random Noise*), o ruido pseudoaleatorio, debido a que en apariencia corresponde a un código totalmente aleatorio, aunque no lo es. Es el código de acceso libre, cualquier usuario civil tiene acceso a él, ya que no viene de algún modo encriptado. En el caso de GPS cada satélite emite un código PRN diferente, mientras que los GLONASS todos emiten el mismo. En GPS tiene una longitud de 300 metros, mientras que en GLONASS es de 600 metros. Atendiendo a que la precisión nominal de correlación es del 1%, tendremos mejor precisión en GPS (3 m) que en GLONASS (6 m).
- **Código P:** Es el código de uso militar. En GPS se emite encriptado, emitiendo lo que conocemos como código Y, mientras que en GLONASS es de acceso libre, aunque las Fuerzas Espaciales Rusas recomiendan no utilizarlo porque puede ser cambiado en cualquier

momento sin previo aviso [59]. En ambos casos tiene una longitud de 30 metros, que atendiendo a la precisión nominal de correlación de un 1%, la precisión es de 0,3 metros. En este caso utilizamos el código C/A a priori para de este modo obtener una primera aproximación de las pseudodistancias, que refinamos posteriormente mediante el uso del código P.

- **Mensaje de Navegación:** Contiene diversas informaciones y no sirve para calcular distancias. Contiene información de las efemérides, a partir de las cuales podemos calcular las órbitas y predecir la posición de cada satélite en el momento de la observación, así como el almanaque, que nos da información sobre las órbitas previstas de los satélites para dicha semana, el estado del satélite y de la constelación (*health*), un modelo ionosférico sencillo y primario para receptores monofrecuencia (solo trabajan con L1) de cara a obtener soluciones de código (no de precisión), y otros parámetros, por ejemplo parámetros temporales y de ajuste del reloj [52].

4.4. SOLUCIONES DE CÓDIGO (GPS ABSOLUTO)

Cuando hablamos de GPS de código nos referimos a técnicas de posicionamiento absoluto, es decir, la determinación de la posición (coordenadas) de un objeto respecto a un sistema de referencia. En este caso la precisión es baja (unos 5 metros de error).

Se trata de la solución GPS más sencilla y se obtiene a partir de tres *pseudodistancias* desde tres satélites al receptor en cuestión, para de este modo obtener la posición de dicho receptor mediante trilateración (figura 52). Al tener más satélites, lo que haremos será una multilateración múltiple de distancias entre satélites y receptor.

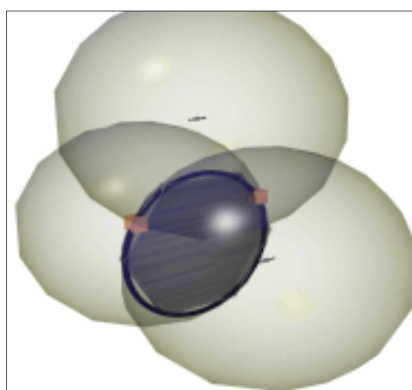


Figura 52. Trilateración en el espacio para obtener una solución GPS [52].

Una **pseudodistancia** es una medida de la distancia entre el satélite y la antena (referente al momento de emisión y recepción de los códigos). El tiempo de transmisión de la señal se mide correlando el código C/A recibido desde el satélite con uno generado en el receptor. Así pues los receptores también generan el mismo código que el satélite, y lo comparan con el código que les llega del satélite para conocer el incremento de tiempo, es decir, el tiempo que tarda en viajar la onda del satélite al receptor.

Los relojes del receptor y de los satélites han de ofrecer la misma base de tiempo, por lo que hay que sincronizar el reloj del receptor con el de los satélites, por lo que tenemos un error de tiempo en el reloj del receptor, al que llamamos τ_R . La distancia entonces se calcula multiplicando la velocidad de la onda, que se propaga a la velocidad de la luz (c), por el tiempo que tarda en viajar la modulación o código. Finalmente la expresión para el cálculo de la pseudodistancia es [60]:

$$r = c \Delta t = c \Delta t(GPS) \pm c \tau_R = d \pm c \tau_R$$

De modo que, como vemos, la pseudodistancia será la distancia real con un error asociado que no podemos estimar a priori y que depende del reloj del receptor. Este error será igual para todas las pseudodistancias calculadas, puesto que trabajamos con un solo receptor.

Por lo tanto ese parámetro τ_R es una incógnita más a introducir al sistema, además de las coordenadas de la posición del receptor X, Y, Z . Existen 4 incógnitas, por lo que serán necesarias 4 ecuaciones para obtener una solución, o lo que es lo mismo, 4 satélites.

4.5. SOLUCIONES DE FASE (GPS DIFERENCIAL DE PRECISIÓN)

En este caso trabajamos con las propias fases de las ondas portadoras y no con los códigos. El receptor registra las portadoras (L1 y L2) y calcula la diferencia de fase entre el satélite y los receptores en el tiempo. El objetivo no será conocer la posición absoluta de un receptor en el espacio, sino conocer la posición relativa entre dos receptores, es decir, buscamos el vector o base línea que une los dos receptores, que se puede expresar como $v = (\Delta X, \Delta Y, \Delta H)$ o $v = (\Delta \phi, \Delta \lambda, \Delta h)$.

Debido a que utilizamos dos receptores, la cobertura para poder obtener una solución tendrá que ser común a ambos receptores, es decir, para realizar los cálculos necesitamos que los satélites que observa un receptor sean los mismos que observa el otro, y además, de forma simultánea: observaciones simultáneas de los mismos satélites desde ambos receptores.

Desde cada receptor realizamos un seguimiento continuo de la señal y contamos el número de ciclos que van pasando a lo largo del tiempo así como la fracción de ciclo inicial en el instante 0 de la medición. Por lo tanto, a cada instante que tomamos datos, la indeterminación de ciclos siempre será la misma, es decir, la del instante 0, que se corresponde a el número entero de ciclos que hay entre el satélite y el receptor. Por tanto sabremos que la distancia es la fracción de ciclo conocida más un número entero de ciclos que desconocemos. A este número entero de ciclos lo llamamos ambigüedad (N). Estimar el número de ambigüedades será el objetivo en este caso para de ese modo conocer el vector entre ambos receptores [60] (figura 53).

Realizaremos el tratamiento diferencial de las fases: **metodología diferencial**. Esta metodología se basa en la diferenciación de datos que reciben dos receptores, observando una serie de satélites comunes a ambos de forma simultánea. Nos basaremos para todo ello en algoritmos de simples, dobles y triples diferencias [60]. Estos procesos tratan de restar dos ecuaciones de fase de dos receptores respecto de un mismo satélite para el caso de **simples diferencias**, la resta de dos ecuaciones de simples diferencias para las **dobles diferencias**, y la

resta de dos ecuaciones de dobles diferencias de los mismos satélites-receptores en dos épocas diferentes para el caso de las **triples diferencias** [60] (figura 54).

Sin entrar en más detalles, tendremos una ecuación de fase para cada satélite-receptor.

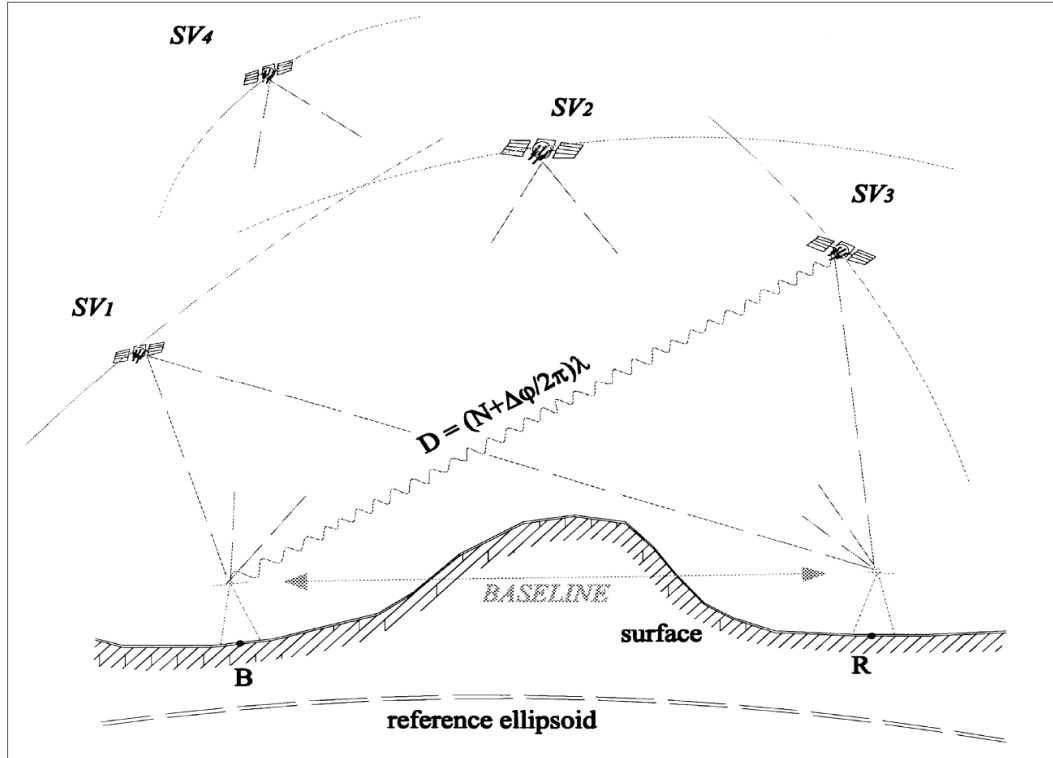


Figura 53. Ejemplo de ocupación en estático en GPS Diferencial [61].

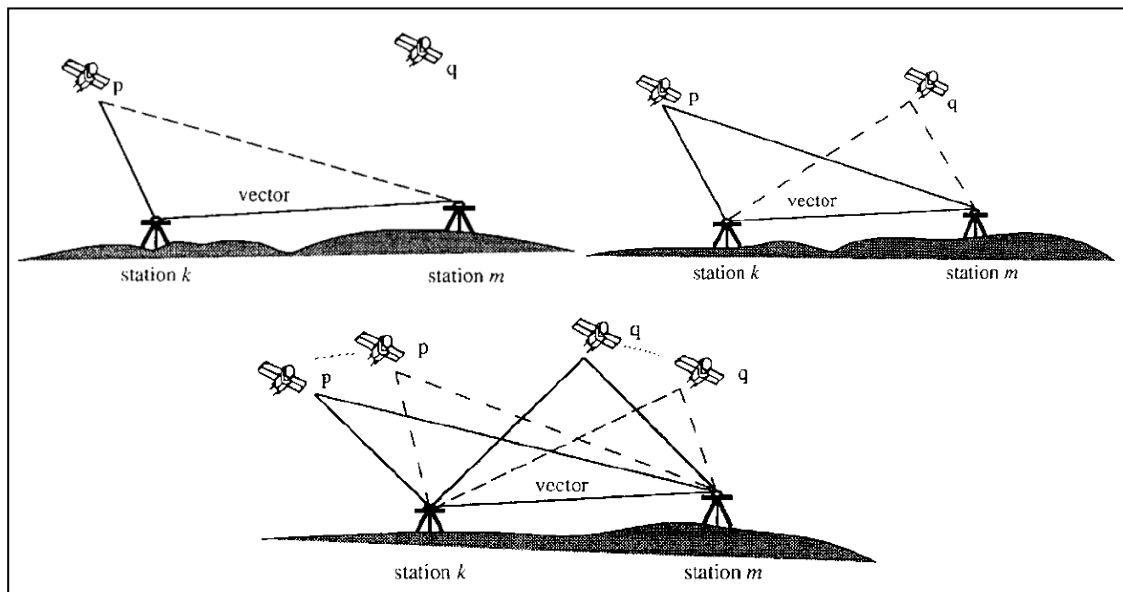


Figura 54. Ejemplo de simples, dobles y triples diferencias, respectivamente [60].

Si obtenemos una solución estadísticamente fiable entonces diremos que es una **solución fija**. En caso contrario, diremos que hemos obtenido una **solución flotante**.

Sin entrar en más detalle diré que para obtener una solución necesitaremos 3 ecuaciones de dobles diferencias linealmente independientes; es decir necesitamos 4 satélites para encontrar la solución del problema [60], al igual que en el caso de soluciones de código o navegación.

Al combinar observaciones GPS y GLONASS hay que tener presente que las frecuencias son diferentes entre ambos sistemas e incluso entre satélites GLONASS. Por tanto, al trabajar con las fases en soluciones diferenciales, el hecho de que las frecuencias sean diferentes entre satélites GLONASS y entre GPS y GLONASS es un problema importante. En [52 y 55] se describe detalladamente el procedimiento a seguir para poder combinar fases diferentes y obtener soluciones fijas y de precisión.

4.6. TÉCNICAS DE OBSERVACIÓN CON GPS DIFERENCIAL. CONCLUSIONES.

Para el caso que nos ocupa necesitamos metodologías que nos ofrezcan soluciones de precisión. Por ello aplicamos la metodología diferencial, trabajando con la fase y no con el código, tal y como se describe en el apartado anterior. Los desplazamientos de puntos de la ladera se obtienen por diferencia de coordenadas medidas en distintos instantes de tiempo. Por ello necesitamos realizar campañas cada cierto período de tiempo para obtener los desplazamientos que se han producido entre ambas adquisiciones de datos. Además, una de las ventajas frente a otras metodologías es que obtenemos la deformación en planimetría y en altimetría por separado, pudiendo asimismo obtener el módulo de la deformación y la dirección y sentido promedio del desplazamiento de la ladera de estudio. Es importante tener en cuenta que el punto de coordenadas conocidas que empleamos como base para hallar las coordenadas del punto que se encuentra sobre la ladera, debe ser un punto situado fuera de la zona de movimiento (zona estable); solo de este modo podremos obtener los desplazamientos del punto medido, dado que si situamos el punto base en zona de movimiento, el resultado final será la “suma vectorial” de los desplazamientos de ambos puntos.

Podemos realizar observaciones en estático o en RTK según se describe en los siguientes apartados.

4.6.1. OBSERVACIONES EN ESTÁTICO

En este caso la metodología consiste en estacionar sobre trípode dos receptores GPS (figura 55), uno sobre cada punto entre los cuales queremos calcular la baselínea o vector GPS, y observar los mismos satélites desde ambos puntos de forma simultánea.

En este caso, los cálculos no se efectúan en tiempo real, sino en post-proceso, mediante un software. Durante la observación almacenaremos únicamente pseudodistancias, que se calculan en tiempo real, así como las observaciones de fase, las efemérides y los estados del reloj de los satélites. A partir de un software resolvemos finalmente la baselínea.

La metodología más habitual es la de estático-rápido o *Fast-Static* (FS) (figura 56), en la que realizamos observaciones en estático de corta duración (10-15 min). Esta metodología es válida para resolver baselíneas de hasta 15 o 20 km de longitud manteniendo una precisión nominal de alrededor de 1 cm o menor. A mayores longitudes de base, mayores tiempos de observación serán necesarios.

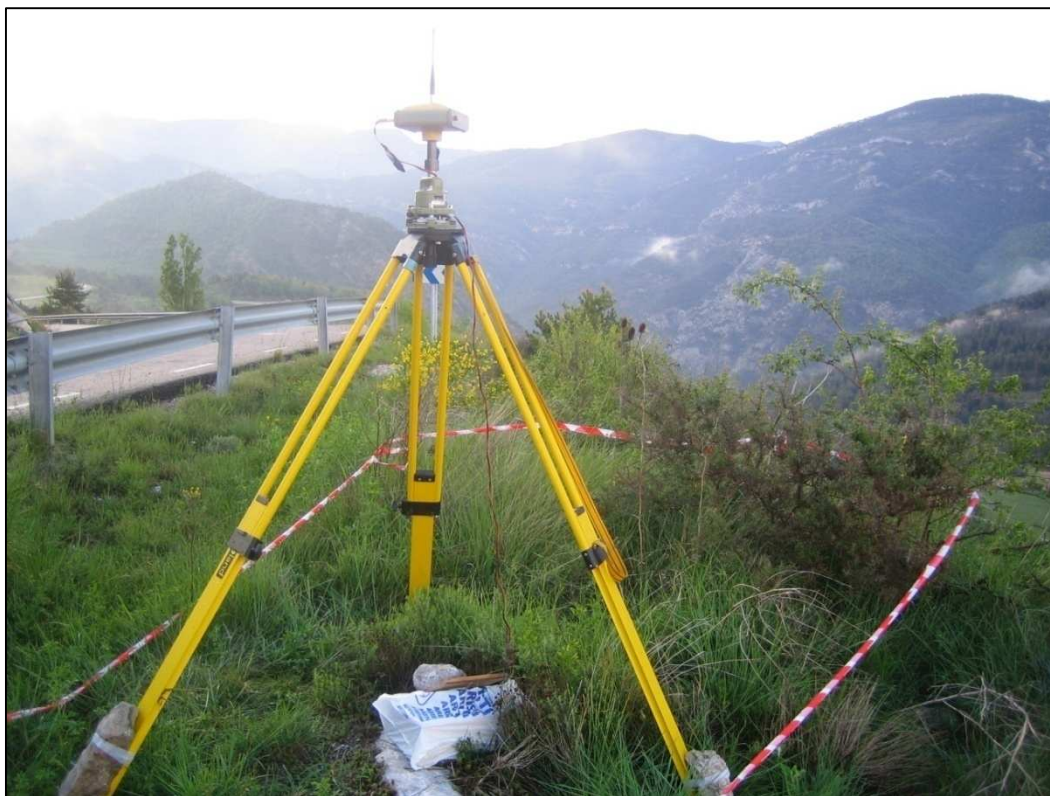


Figura 55. Receptor base estacionado en Vallcebre durante la campaña de medición en mayo de 2011.

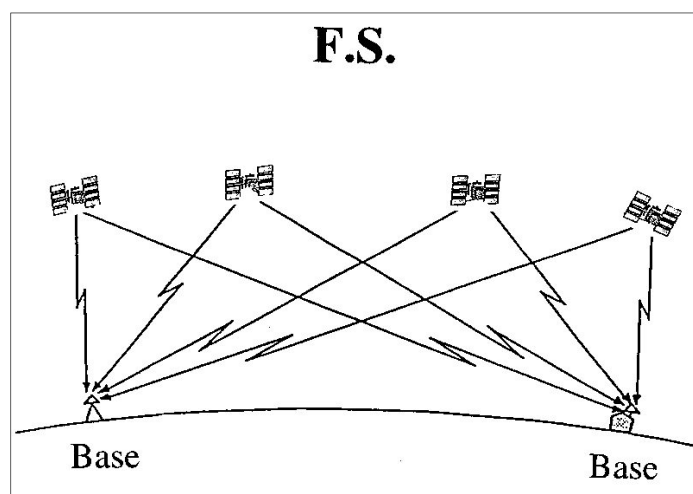


Figura 56. Esquema del método de observación estático-rápido [61].

Si damos por conocidas las coordenadas de uno de los dos puntos y aplicamos el valor de la baselínea calculada, obtendremos las coordenadas del otro punto. El método descrito se corresponde a algo similar a una radiación en topografía clásica.

Como se observa, se trata de un método de medida de desplazamientos discontinua en el tiempo, ya que únicamente tenemos datos al realizar cada una de las campañas. Este hecho presenta un inconveniente dado que no conoceremos la evolución real de los movimientos en el tiempo, algo especialmente importante para estudiar aceleraciones y deceleraciones sobre la ladera especialmente en períodos de precipitaciones. Un modo de solucionar este problema y poder conocer la evolución de la ladera de forma continua es monitorizar la ladera con estaciones GPS permanentes.

Si disponemos de varios receptores hay que tender a generar determinaciones por redundancia, “cerrando” triángulos o cuadriláteros, de modo que obtendremos resultados más robustos. Por ejemplo podemos calcular las coordenadas del punto incógnita radiando simultáneamente desde dos puntos de coordenadas conocidas, para lo que necesitamos tres receptores, dos de ellos colocados sobre puntos de coordenadas conocidas y otro que iremos colocando sobre el punto del cual queremos obtener las coordenadas. Esta metodología nos permite realizar compensaciones y obtener una mayor robustez y precisión en el resultado final (figura 57), y se asemeja a una triangulación en topografía clásica.

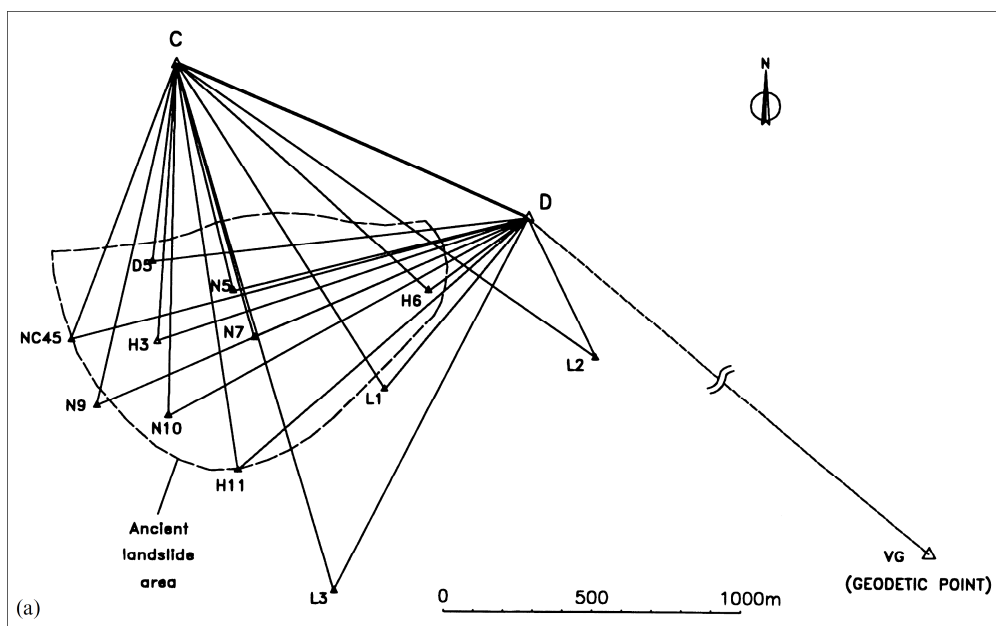


Figura 57. Ejemplo de “triangulación GPS”. Mantenemos dos receptores estacionados, uno en C y otro en D, para calcular las coordenadas de cada punto de la ladera inestable. En caso de no tener posición de C y D necesitaremos un punto de coordenadas conocidas externo (VG) [61].

Asimismo se pueden calcular redes realizando ocupaciones por cada par de puntos de la red, obteniendo las baselíneas entre ellos de modo que obtengamos la mayor robustez posible e incluso llevar a cabo compensaciones minimocuadráticas en red (ajustes en red) para obtener mayor precisión gracias al ajuste estadístico [62].

También es posible emplear los datos registrados desde estaciones permanentes o crear estaciones virtuales [63].

Finalmente es conveniente comprobar los resultados con otras técnicas (topografía clásica, extensómetros de cable, etc.). Es necesario asimismo incluir puntos estables a dicha red de control para verificar que los puntos de referencia son efectivamente estables.

4.6.2. OBSERVACIONES EN RTK

RTK son las siglas de *Real Time Kinematic*, o lo que es lo mismo, cinemático en tiempo real. Se trata de una técnica GPS diferencial basada en el estacionamiento de un receptor GPS sobre trípode en un punto de coordenadas conocidas que permanecerá estático, al que llamamos Base, y el empleo de un receptor GPS sobre un jalón al que llamamos *Rover* (figuras 58 y 59) y que vamos moviendo y verticalizando sobre puntos, obteniendo las coordenadas de los mismos en tiempo real.

Para ello es necesario dar coordenadas al receptor Base, así como un proceso de inicialización del mismo (hasta que fije ambigüedades), por tal de que emita correcciones diferenciales de fase por radio o GPRS, de manera que el receptor *Rover* las reciba y poder empezar a radiar puntos (figura 60). El receptor fijo o Base envía un mensaje que contiene su posición, las pseudodistancias medidas mediante solución de código, y las medidas de fase registradas por el mismo. El resultado final es un receptor móvil que conoce su posición cada segundo, incluso cuando éste se encuentra en movimiento: se obtienen las coordenadas de los puntos directamente en tiempo real. La precisión de esta metodología es algo inferior estático-rápido, pero se mantiene en torno a los 2 o 3 cm.

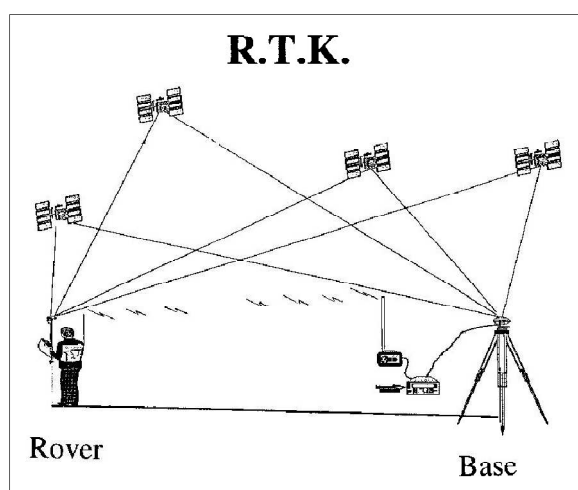


Figura 58. Principio del funcionamiento del RTK, donde se observa el receptor Base emitiendo correcciones al receptor Rover, que se encuentra en movimiento [61].

Este método necesita asimismo 4 o más satélites para trabajar. Dada el registro continuo de la fase desde los satélites, se trata de un método muy sensible a la pérdida de la señal, por lo que es recomendable tener más de 4 satélites, convenientemente 5 o 6. Los métodos estáticos no

tienen tanto problema en este sentido dado que los observables se registran en intervalos de como mínimo 5 o 10 segundos habitualmente, y no cada segundo como en el caso de RTK.

Asimismo el sistema permite emplear únicamente un receptor Rover y recibir las correcciones diferenciales de fase por GPRS desde una estación de referencia permanente [63].



Figura 59. Fotografía de un receptor Rover tomando las coordenadas de un punto en Vallcebre en RTK (Campaña de medición de mayo de 2011).

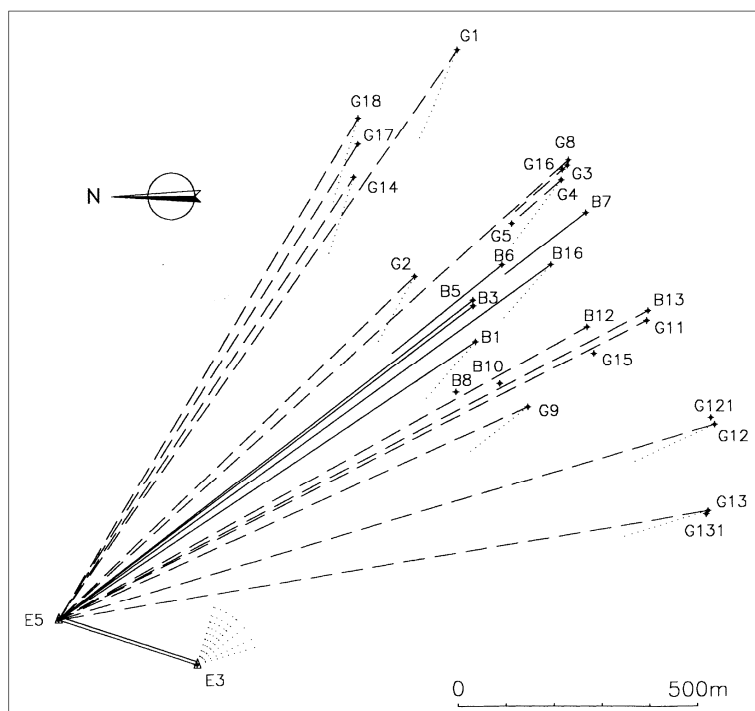


Figura 60. Esquema de funcionamiento de un sistema RTK, donde a partir de E5 (Base) se han radiado el resto de puntos (Rover). Entre E5 y E3 existe una baselínea medida en estático [61].



Figura 61. Fotografía de un receptor Rover tomando las coordenadas de un punto en Vallcebre en RTK (Campaña de medición de mayo de 2011).



Figura 62. Fotografía de un receptor Rover tomando las coordenadas de un punto en Vallcebre en RTK (Campaña de medición de mayo de 2011).

4.6.3. CONCLUSIONES

En la tabla 12 se resumen los distintos métodos de observación GPS, sus precisiones y campos de aplicación.

Nivel	Principio de medida y número de equipos	Precisión típica
1. Navegación	Código (1 equipo)	C/A Code, SA off: 20 m (P code, miliar: 1 a 10 m)
2. Topografía a pequeña escala, GIS, navegación de precisión	Código (1 o más equipos)	1 a 5 metros
3. Topografía y geodesia	Fase (2 o más equipos)	RTK: 10mm + 2ppm FS: 5mm + 1ppm

Tabla 12. Descripción de los sistemas básicos de GPS [57]

Es evidente que los métodos GPS que hemos de emplear para la medida de desplazamientos será precisamente los de Nivel 3: Topografía y geodesia. Dentro de este grupo hay que decidir la técnica que queremos emplear para la obtención de coordenadas en cada campaña. En laderas donde los desplazamientos sean muy grandes puede ser suficiente el uso de RTK, mientras que en laderas donde el movimiento es muy pequeño es probable que necesitemos emplear el método estático-rápido.

Hay que tener en cuenta que la elección del RTK puede ser la mejor solución en muchos casos, que aunque nos ofrece una menor precisión, es un método mucho más rápido y operativo, en el que es necesario moverse únicamente con un receptor sobre un jalón (figuras 59, 61 y 62) y obtenemos directamente las coordenadas del punto deseado.

Sin embargo el uso del método estático-rápido, a pesar de que es más preciso, es de más costosa aplicación, dado que es necesario estacionar en cada punto sobre el que queremos obtener las coordenadas, esperar un tiempo (10-15 min) y además obtener las coordenadas en post-proceso y no en tiempo real.

Tal y como hemos comentado, los desplazamientos de puntos de la ladera se obtienen por diferencia de coordenadas medidas en distintos instantes de tiempo. Por ello necesitamos realizar campañas cada cierto período de tiempo para obtener los desplazamientos que se han producido entre ambas adquisiciones de datos. Además, una de las ventajas frente a otras metodologías es que obtenemos la deformación en planimetría y en altimetría por separado, pudiendo asimismo obtener el módulo de la deformación y la dirección y sentido promedio del desplazamiento de la ladera de estudio.

Por lo tanto es importante establecer a priori unos criterios en función de la precisión requerida y de los equipos, el personal y el tiempo del que disponemos para realizar cada campaña de observación. A partir de dichos condicionantes escogeremos el método que más se ajuste a nuestras necesidades y recursos.

5. TOPOGRAFÍA CLÁSICA

5.1. INTRODUCCIÓN

En este caso establecemos redes topográficas sobre la ladera de estudio, apoyando dichas redes topográficas sobre puntos estables, que previsiblemente se encuentren fuera de la ladera de estudio. Más información sobre dichas técnicas pueden hallarse en [64].

Al igual que en GPS, los desplazamientos de puntos de la ladera se obtienen por diferencia de coordenadas medidas en distintos instantes de tiempo. Por ello necesitamos realizar campañas cada cierto período de tiempo para obtener los desplazamientos que se han producido entre ambas adquisiciones de datos. Los métodos de topografía clásica son costosos de cara a monitorizar el movimiento de laderas, de manera que no es la solución más adecuada.

En topografía clásica es necesario establecer visuales de la base o punto de referencia (en zona estable) a los puntos de medida que se encuentran sobre la ladera. Este aspecto puede resultar especialmente difícil y costoso, especialmente en los casos en los que no podemos situar dichos puntos estables sobre zonas de la misma ladera y por lo tanto hemos de situarlos fuera de la misma, por ejemplo en la ladera o área enfrentada a la misma o en zonas hacia las que no tenemos una visibilidad directa.

Los métodos de topografía clásica están siendo reemplazados por técnicas GPS, que dada su elevada cobertura, productividad y una precisión similar resultan más adecuados. Además, a diferencia de la topografía clásica, no es necesaria una visual directa entre dos estaciones, lo que permite calcular baselíneas muy precisas entre estaciones que están en los lados opuestos de edificios o montañas.

5.2. APLICACIÓN: VALIDACIÓN DE RESULTADOS EN GB-SAR

Actualmente los métodos de topografía clásica son una buena herramienta para validar o comprobar el correcto funcionamiento de otras técnicas más modernas y por lo tanto más complejas, donde es necesario verificar el correcto funcionamiento de las mismas. Un claro ejemplo es su uso para comprobar las medidas tomadas con GB-SAR.

El GB-SAR se instala sobre la ladera enfrentada a la ladera inestable de estudio, hallando las deformaciones por campañas consecutivas al igual que en GPS, tal y como se explica en apartados anteriores. Justo detrás del punto medio del raíl del GB-SAR instalamos la estación total (figura 63) y realizamos mediciones de distancia con el distanciómetro a puntos concretos de la ladera mediante el uso de un prisma reflector (figura 64). Además tomamos lectura de ángulos horizontales y verticales, previa orientación de la estación, con el fin de poder llegar a obtener coordenadas de los puntos medidos sobre la ladera en el caso de que sea necesario.

La precisión nominal en la medida de la distancia depende fundamentalmente de la calidad del distanciómetro, y es de alrededor de 1 o 2 cm para medidas de entre 500 y 1000 metros.



Figura 63. Fotografía en la que se aprecia la estación total situada tras el punto medio del raíl GB-SAR en funcionamiento. El punto estación debe materializarse adecuadamente sobre el terreno por tal que no se pierda o sufra movimientos indeseables.



Figura 64. Prisma reflector sobre uno de los puntos inestables de la ladera, en este caso un punto marcado sobre el mástil de un corner reflector. La estación total está tomando medidas de ángulos y distancia en este momento.

La expresión que se deduce aplicando el teorema del coseno y considerando un caso en el que estacionamos más alto respecto de la campaña de referencia nos da la distancia geométrica corregida para una campaña determinada (figura 65):

$$Dg = \sqrt{(i' - i)^2 + Dg'^2 - 2 \times (i' - i) \times Dg' \times \cos(200^g - LV')}$$

De igual modo podemos deducir cuál hubiese sido el ángulo vertical medido en el caso de haber estacionado a la altura de la campaña de referencia:

$$LV = 200^g - \arcsin\left(\frac{Dg' \times \sin(200 - LV')}{Dg}\right)$$

Cabe destacar que el estacionamiento a altura constante resulta tedioso y lento, dado que consiste en un proceso iterativo que rara vez nos lleva a una altura de estación que se corresponda hasta el milímetro con la deseada. Por ello resulta más cómodo estacionar a altura libre y corregir dicha distancia en gabinete mediante las expresiones expuestas. En la siguiente fotografía un ejemplo de la estación total estacionada tras el GB-SAR (figura 66).



Figura 66. Fotografía en la que se aprecia la estación total situada tras el punto medio del raíl GB-SAR en funcionamiento.

6. COMPARATIVA ENTRE TÉCNICAS. CONCLUSIONES.

6.1. INTRODUCCIÓN

Una gran variedad de técnicas han sido desarrolladas para la monitorización de movimientos. Las técnicas que son motivo de análisis en este trabajo se resumen a continuación, según si son técnicas en “superficie” (tabla 13) o técnicas a partir de determinaciones en sondeo (tabla 14).

Método	Resultado	Rango típico	Precisión típica
Med. Electrón. Dist.	Δ distancia	Usual 1 – 14 km	(1 a 5 mm)+ (1 a 5 ppm)
Poligonación	$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	Variable	5-20 mm
Triangulación	$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	< 300 – 1000 m	5-20 mm
GPS Fast-Static	$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	Usual <20 km	(5 a 10 mm)+ (1 a 2 ppm)
GPS RTK	$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	Usual <5 km	(5 a 10 mm)+ (3 a 5 ppm)
GB-SAR	Δ distancia en L.O.S.	100-1000 m	< 1 mm

Tabla 13. Métodos para monitorización de laderas “en superficie” [57]

Método	Resultado	Rango típico	Precisión típica
Extensómetros cable	Δ distancia	< 10 – 80 m	0,3 mm/30m
Inclinómetro (fijo)	$\Delta X, \Delta Y$	$i < 20^\circ$, opcional 90°	0,05 mm en 3 m
Piezómetros	$\Delta P_w, \Delta H_w$	10 a 50 m profundidad	30 mm

Tabla 14. Métodos para monitorización de laderas mediante determinaciones en sondeo [57]

6.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES

A continuación se muestra una tabla donde se resumen las ventajas e inconvenientes de cada técnica de medida empleada, centrándonos en el caso de medida de desplazamientos en laderas inestables:

	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Extensómetro de Cable	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema sencillo. - Elevada precisión (submilimétrica). - Permite medir grandes deformaciones (metros). - Permite el registro de medidas en continuo (monitorización). 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de realizar un sondeo para su instalación (alto coste inicial). - Únicamente facilita el módulo de la deformación o deslizamiento.
Inclinómetros	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada precisión (submilimétrica) - Permite hallar el ángulo de deslizamiento de la ladera. - Permite el registro de medidas en continuo (monitorización). - Permite obtener $\Delta X, \Delta Y$. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de realizar un sondeo para su instalación (alto coste inicial). - Sistemas complejos y caros. - No permite grandes deformaciones, quedando inutilizado a los pocos centímetros de deformación.

Piezómetros (Cuerda vibrante)	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada precisión. - Fácil uso. - Posibilidad de medir presiones de agua negativas. - Permite el registro de medidas en continuo (monitorización). 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de realizar un sondeo para su instalación (alto coste inicial). - La cuerda está sujeta a corrosión (afecta sobre la durabilidad del instrumento). - No mide desplazamientos.
Ground – Based InSAR	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada precisión (submilimétrica). - Proporciona una imagen 2D de la ladera de estudio. - Elevado alcance (hasta 3 km). - Elevada resolución espacial, con píxeles de hasta 0,5 metros en range y 4 mrad en azimuth, obteniendo una imagen cada 7 – 10 minutos. - No es necesario realizar sondeos. - Se pueden realizar campañas en continuo, aunque requiere muchos recursos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipo caro (> 100.000€) - Equipo pesado y requiere alimentación considerable (baterías, generadores...). - Requiere estar sobre una zona estable para medir los desplazamientos, y que tener visibilidad de toda la ladera. - Lo habitual es hacer campañas puntuales (no monitorización en tiempo real). - Pérdida de coherencia en zonas vegetadas. Necesidad de emplear <i>corner reflectors</i> en dichas zonas, lo que implica instalarlos y desinstalarlos en cada campaña. - Artefactos atmosféricos afectan mucho a las señales; necesidad de corregirlo. - Necesidad de post-proceso complejo. - Necesidad de una instalación compleja en caso de monitorización en tiempo real (campañas en continuo).
Sistemas GNSS	<ul style="list-style-type: none"> - Elevada precisión empleando técnicas diferenciales (1 cm en estático FS / 2-3 cm en RTK). - No es necesaria intervisibilidad entre puntos, que además pueden estar a varios kilómetros de distancia y obtener dichas precisiones. - Bajo coste y sencillo de utilizar. - Altos rendimientos con el sistema cinemático RTK. - Sirve para calibrar el cable extensométrico en su fase inicial. - Permite de registrar medidas en continuo empleando estaciones permanentes, aunque es caro y poco habitual. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja resolución espacial: únicamente realiza medidas puntuales, por lo que no proporciona una imagen completa de la ladera de estudio. - Lo habitual es hacer campañas puntuales (no monitorización en tiempo real). - Requiere puntos fijos cercanos de referencia para medir los desplazamientos. - Baja precisión o imposible obtener soluciones en zonas con poca visibilidad (edificios y muros próximos, observando bajo zonas arboladas, etc.). - Requiere post-proceso para precisiones más elevadas (técnicas en estático).
Topografía Clásica	<ul style="list-style-type: none"> - La medida electromagnética de distancias con estación total es muy útil para calibrar o comparar resultados en técnicas GB-SAR u otras, con elevada precisión (centimétrico) y elevado alcance (más de 1 km). - Requiere instrumentación muy sencilla (estación total). 	<ul style="list-style-type: none"> - Es una técnica lenta y requiere recursos y tiempo; prácticamente substituida por el GPS en la actualidad. - Requiere intervisibilidad entre elementos (Line Of Sight óptica). - Baja resolución espacial: únicamente realiza medidas puntuales, por lo que no proporciona una imagen completa de la ladera de estudio.

6.3. CONCLUSIONES

Es bastante habitual que las técnicas de medida de deformaciones funcionen mediante campañas de medición puntuales, a partir de las cuales obtenemos el diferencial de desplazamiento entre dos épocas sucesivas (semanas, meses o años). En este caso consideramos que la velocidad a la que se han producido dichos desplazamientos es constante en el tiempo entre ambas campañas de medición. Existen métodos de monitorización que permiten la lectura continua de datos, de modo que podemos conocer la evolución continua de las deformaciones en el tiempo y detectar comportamientos de aceleración o deceleración de movimientos que suceden de forma puntual y van previsiblemente asociados a algún factor externo, como por ejemplo el efecto de la lluvia. El seguimiento de dichos movimientos nos servirá para establecer las causas del fenómeno base.

A continuación se describen algunas consideraciones a tener en cuenta en la monitorización de laderas [61 y presente trabajo]:

- Los puntos seleccionados deben reflejar en la medida de lo posible el comportamiento del área en el que se encuentran. Por lo tanto hay que descartar la elección de puntos que puedan tener movimientos propios, aunque en ocasiones es inevitable.
- Es conveniente usar más de una técnica para poder complementar y contrastar los resultados obtenidos, es decir, verificar la calidad de los mismos. No es una buena idea emplear un solo método de medida.
- Técnicas que nos permitan una lectura en continuo serán preferibles por delante de aquellas que precisen de campañas puntuales para la adquisición de datos, aunque tiene ciertos inconvenientes, fundamentalmente un posible elevado coste de instalación.
- Fundamental la elección adecuada de la instrumentación a emplear en cada caso. Será función de las características de la ladera de estudio, por ejemplo de la magnitud de sus movimientos o de la precisión requerida en la medida de los mismos.
- Los condicionantes de emplazamiento, de tiempo, técnicos y económicos son los que van a dictar cuál o cuáles se van a emplear.
- Es conveniente incluir en la red de control una serie de puntos fijos que se encuentren fuera de la ladera de estudio. El movimiento aparente de los puntos que se encuentran en la franja estable nos ofrece directamente la calidad o grado de fiabilidad de los desplazamientos medidos. También conviene la repetición de observaciones realizadas y cierta redundancia de datos.
- Únicamente sistemas automáticos, de registro continuo y con transmisión remota de los resultados pueden constituir la base para sistemas de alerta temprana (*Early Warning*) que sirvan de ayuda para gestionar situaciones de especial riesgo.

En laderas como la de Vallcebre, la magnitud del movimiento es fuertemente dependiente de los períodos lluviosos, por lo que es recomendable tener un registro continuo de la pluviometría de la zona para cruzarla con los datos piezométricos y de desplazamientos medidos (mejor en continuo). Es muy probable que nos encontremos que en períodos de lluvia exista una aceleración en los desplazamientos medidos, producida por un aumento de presión intersticial en el subsuelo que hace disminuir la tensión efectiva del terreno en profundidad.

III. PROCESADO DE LAS OBSERVACIONES RADAR Y RESULTADOS.

1. INTRODUCCIÓN. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS MEDIDOS.

Una vez caracterizado el lugar de estudio (ladera de Vallcebre), así como descritas las técnicas geomáticas aplicadas sobre el mismo, se plantea a continuación la metodología seguida para el procesado de los datos disponibles hasta la obtención de los resultados finales, es decir, desplazamientos. Cabe destacar que en este caso nos centramos en el estudio de la unidad inferior de la ladera de Vallcebre, dado que es dónde hemos realizado las observaciones. No nos interesa el movimiento de las unidades intermedia ni superior de la ladera.

En primer lugar disponemos de datos Radar terrestres (GB-SAR), más concretamente una serie de datos tomados en continuo **durante 19 días (noviembre-diciembre de 2010)**. No se han empleado datos de campañas puntuales en este caso dado que la información obtenida en continuo es suficiente para explotar todas las posibilidades de la técnica GB-SAR en cuanto a la medida de desplazamientos a partir de medidas de fase sobre blancos coherentes.

Durante la campaña en continuo se tomaron datos atmosféricos (humedad relativa, temperatura y presión) de tres ubicaciones de la unidad inferior de la ladera - coincidentes con tres *corner reflectors* - mediante sensores instalados en la base de los mismos.

Asimismo, se han realizado campañas topográficas con estación total de forma pareja a las campañas GB-SAR mencionadas.

Todos los datos de las campañas GB-SAR, topográficas y de datos atmosféricos (humedad relativa, temperatura y presión) han sido cedidas por el *Institut de Geomàtica*.

Dada la naturaleza de la ladera, los desplazamientos obtenidos mediante técnicas radar son los relativos a puntos de alta coherencia y alta potencia de refracción de señal, es decir, *corner reflectors* instalados en la propia ladera. Asimismo cabe destacar que los desplazamientos que se obtienen son en la LOS (*Line of Sight*), es decir, en la dirección sensor-blanco.

En un principio el objetivo del TFC era poder cruzar también los datos GB-SAR con datos del cable extensométrico y de la piezometría, pero finalmente no ha sido posible dada la imposibilidad de conseguir dichos datos del periodo de tiempo estudiado.

Por otro lado se han realizado dos campañas de observación con GPS diferencial en RTK, una de ellas en marzo de 2010 y otra en mayo de 2011. No se han podido emplear dichas mediciones de cara a este trabajo dado que mediante GPS únicamente podemos hallar el desplazamiento que se ha producido en unos 13 meses en total, y la observación GB-SAR en continuo tiene una duración concreta de 19 días a lo largo de los meses de noviembre y diciembre de 2010, de modo que no es posible cruzar estos datos.

Cruzar datos GB-SAR con datos topográficos no resulta un problema dado que la localización de puntos GB-SAR y topográficos son coincidentes o aproximadamente coincidentes, pero a la hora de aprovechar datos GPS, de extensómetro de cable y piezometría sería necesario

escoger ubicaciones adecuadas y confeccionar 'nodos', de tal forma que el resultado de cruzar los datos sea representativo. El criterio para la confección de los 'nodos' debe ser el de escoger puntos suficientemente próximos entre si para poder considerar que su comportamiento es el mismo.

Dado que en este trabajo nos centramos fundamentalmente en la medida y monitorización de deformaciones asociadas a movimientos de ladera (particularizando en la unidad inferior de la ladera de Vallcebre), de cara a las observaciones con GB-SAR será difícil encontrar blancos que ofrezcan una fase interferométrica estable (reflectores naturales), y por lo tanto, es necesaria la instalación de reflectores artificiales o *corner reflectors*. Cabe destacar que la instalación de estos elementos es costosa, debido al número de *corners* necesarios en cada escenario y su debido transporte, colocación y orientación necesaria antes de efectuar cada medida SAR.

Tal y como se ha explicado anteriormente existen dos modalidades posibles de observación GB-SAR:

- a) **Campañas puntuales:** capturamos diversas imágenes SAR durante un período corto de tiempo (por ejemplo una hora) y no volvemos a tomar más medidas hasta que el terreno se haya desplazado lo suficiente, por ejemplo dos meses más tarde. De este modo obtenemos imágenes SAR en dos momentos separados en el tiempo y diferenciando entre dichas imágenes hallaremos el desplazamiento en la LOS (*Line of Sight*) que se ha producido en el lapso de tiempo comprendido entre ambas campañas.

- b) **Campañas en continuo:** capturamos imágenes SAR ininterrumpidamente a lo largo de un largo período de tiempo, por ejemplo una semana, obteniendo cientos o incluso miles de imágenes SAR del mismo escenario. Podemos obtener desplazamientos diferenciando entre imágenes del inicio y del final de la campaña del mismo modo que en campañas puntuales, o entre momentos intermedios. Además, podemos obtener aceleraciones y deceleraciones de dichos movimientos: permite la monitorización de desplazamientos en continuo. Por otro lado, con esta modalidad podemos obtener datos del comportamiento atmosférico a lo largo del tiempo, analizando las variaciones de fase que se producen en cortos períodos de tiempo, por ejemplo a lo largo de la puesta de sol, variaciones de respuesta diurna-nocturna, o por ejemplo en determinados momentos singulares (lluvia, fuerte viento o nieve). Tal y como se ha comentado, los datos GB-SAR que se han procesado y tratado en este trabajo se corresponden a una campaña de observación en continuo.

Hay que tener especial cuidado en la interpretación y análisis de los datos, dado que las deformaciones se obtienen en dirección de la LOS (*Line of Sight*), es decir, en la dirección entre el sensor y el blanco o punto estudiado en cada caso.

Los *corner reflectors* de la ladera de Vallcebre y el GB-SAR de la campaña en continuo están localizados tal y como se muestra en las figuras 67, 68, 69 y 70.

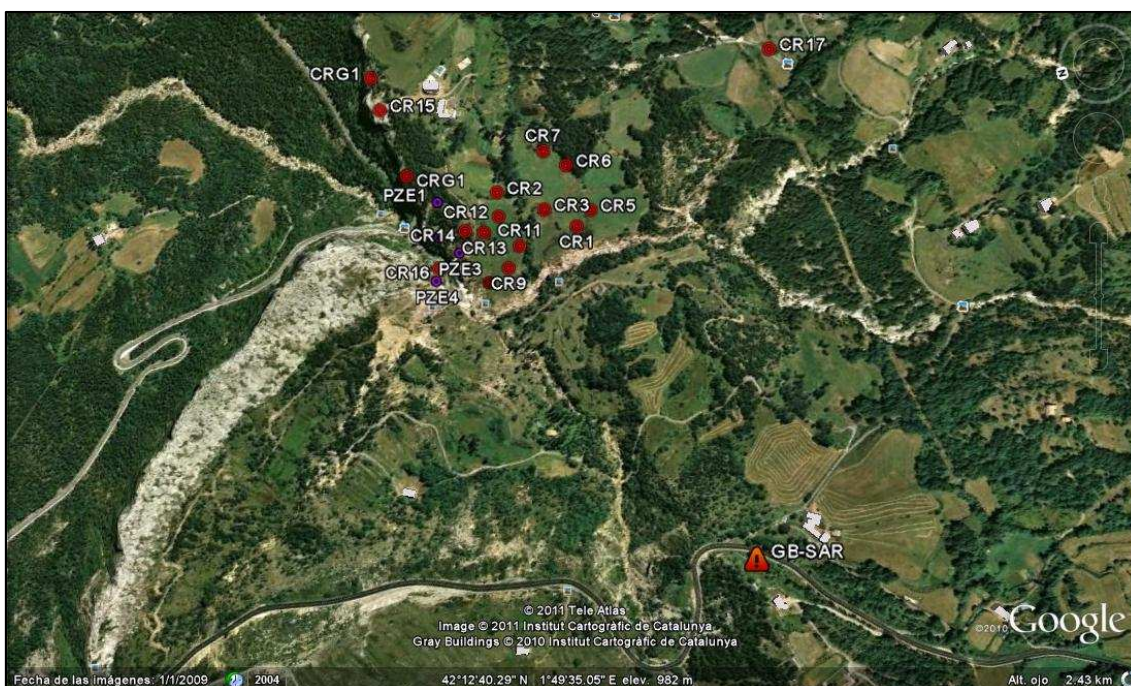


Figura 67. Situación de los puntos monitorizados de la unidad intermedia de la ladera de Vallcebre y situación del sensor GB-SAR en la ladera enfrentada a la misma [66]

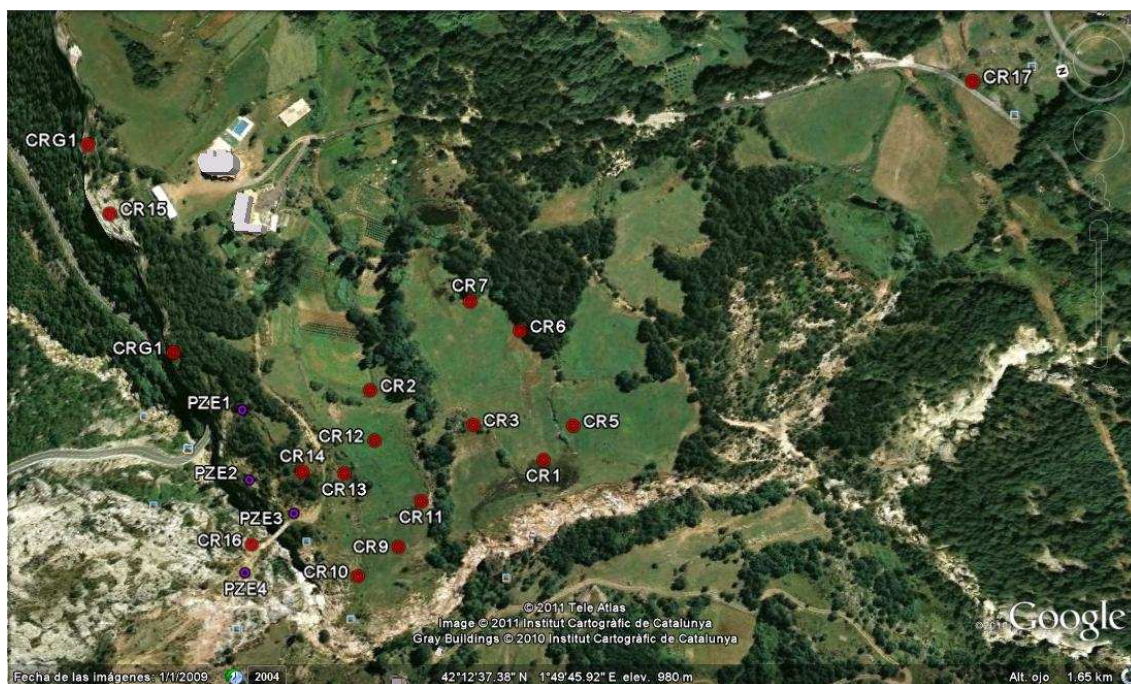


Figura 68. Situación de los puntos monitorizados de la unidad intermedia de la ladera de Vallcebre [66].

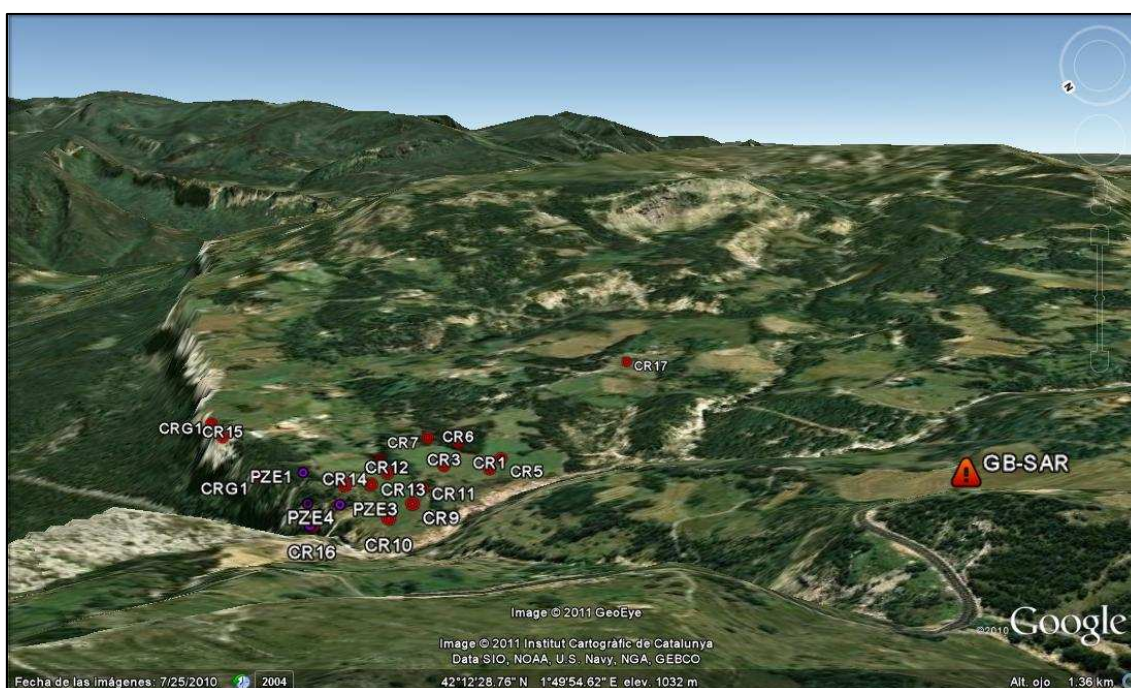


Figura 69. Vista tridimensional de los puntos monitorizados de la unidad intermedia de la ladera de Vallcebre y situación del sensor GB-SAR en la ladera enfrentada a la misma [66].

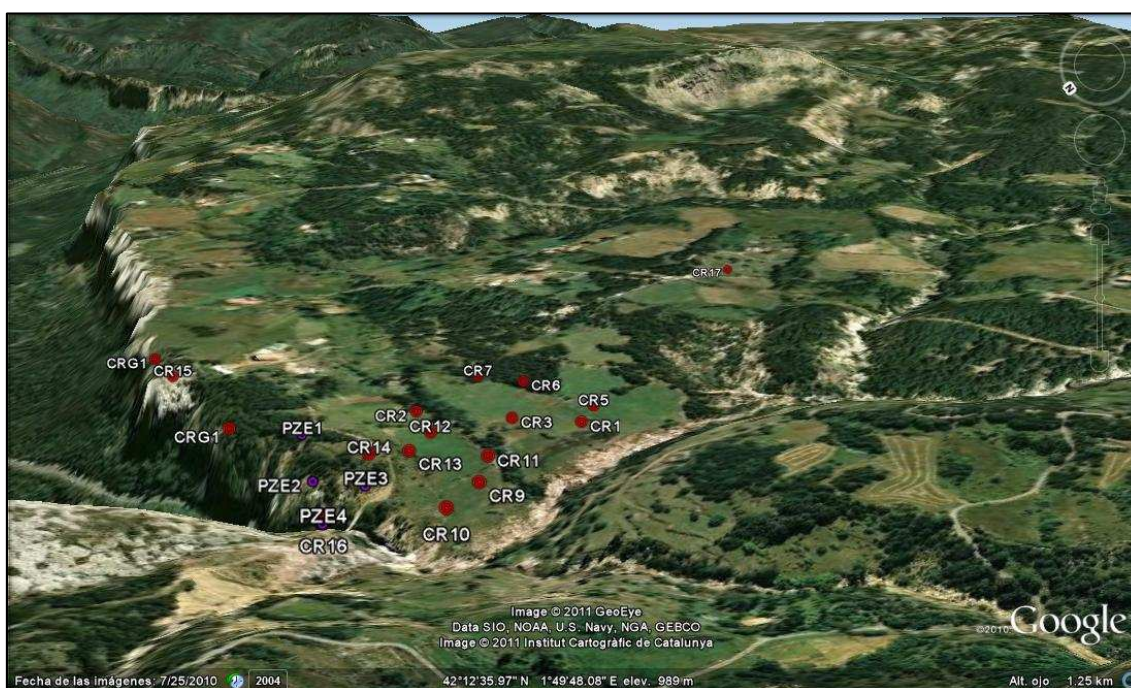


Figura 70. Vista tridimensional de los puntos monitorizados de la unidad intermedia de la ladera de Vallcebre [66].

2. EFECTOS DE LA ATMÓSFERA SOBRE LA FASE

Tal y como se ha explicado en los apartados anteriores, el estado atmosférico afecta fuertemente sobre las señales, produciendo un retraso de las mismas en su propagación entre el sensor y el blanco en su recorrido de ida y vuelta, de forma que el diferencial de fase medido entre dos instantes de tiempo es:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{dist} + \Delta\phi_{atmos} + \Delta\phi_{ruido} = \Delta\phi_{2K\pi} + \Delta\phi_{x\pi} + \Delta\phi_{atmos} + \Delta\phi_{ruido}$$

Donde:

- ϕ_{dist} es la fase debida a la distancia real entre el sensor y el blanco.
- $\phi_{2K\pi}$ es la fase debida a la distancia real entre el sensor y el blanco considerando únicamente el número de ciclos enteros (K) en el recorrido de ida y vuelta.
- $\phi_{x\pi}$ es la fase debida a la distancia real entre el sensor y el blanco considerando únicamente la fracción de ciclo medida en el recorrido de ida y vuelta.
- ϕ_{atmos} es el término de fase debido al efecto atmosférico (*artefactos atmosféricos*)
- ϕ_{ruido} es el término de fase debido al ruido inherente al sistema.

Obviando el ruido tenemos que:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{dist} + \Delta\phi_{atmos}$$

La componente $\Delta\phi_{atm}$ puede representar una fuente muy importante de error. Los artefactos atmosféricos afectan directamente sobre las ondas radar que se propagan entre el sensor y el blanco, produciéndose un efecto de retardo sobre las mismas. Las imágenes no adquiridas al mismo tiempo pueden haber sido tomadas en condiciones atmosféricas diferentes, por lo que el término $\Delta\phi_{atm}$ no será igual a 0.

Como se aprecia, puntos fijos sobre el terreno donde $\Delta\phi_{dist} = 0$ tendrán movimiento aparente debido al retraso o avance de la fase dado que $\Delta\phi_{atmos} \neq 0$.

Como se ha comentado en apartados anteriores, los efectos atmosféricos que afectan sobre las señales son fundamentalmente la humedad, temperatura y presión atmosférica, por orden de importancia; conociendo estos parámetros podremos estimar el índice de refracción atmosférica N. La fase registrada contiene un error importante que es necesario corregir para poder obtener una solución coherente. Conociendo ϕ_{atm1} y ϕ_{atm2} para cada blanco estudiado y en cada imagen podremos eliminar dicho error atmosférico para poder aislar el término que nos interesa ($\Delta\phi_{dist} = 2 \cdot \phi_{mov}$).

Un posible método para estimar ϕ_{atm} es disponer sensores de humedad y temperatura en la base de los *corner reflectors* (figura 71), y estimar una ϕ_{atm} en función de la distancia a la que nos encontremos del sensor SAR. Una vez generado dicho modelo atmosférico para un instante de tiempo determinado, lo aplicaremos a todos los blancos de las imágenes tomadas para dicho instante.

De este modo podemos llegar a una imagen SAR corregida en la que la fase se corresponda únicamente a la componente de la distancia (función de la topografía del terreno). Diferenciando entre dos imágenes SAR corregidas por dicho efecto atmosférico hallaremos $\Delta\phi_{dist} = 2 \cdot \phi_{mov}$ y finalmente el valor del desplazamiento:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\phi_{dist}$$



Figura 71. Sensor de temperatura y humedad situado en la base de un corner reflector de Vallcebre. Registra dichos valores cada 5 minutos.

3. DATOS BRUTOS OBSERVADOS EN CAMPO

Durante los meses de noviembre y diciembre de 2010 se llevó a cabo una observación en continuo de la ladera de Vallcebre de una duración total de 19 días a cargo del *Institut de Geomàtica*.

El estudio de escenarios vegetados como el de Vallcebre es especialmente complicado ya que es imposible o casi imposible obtener imágenes con una coherencia adecuada para su procesado (fuerte decorrelación entre imágenes; baja coherencia). Por este motivo es necesaria la colocación de elementos sobre el terreno que tengan una buena respuesta, es decir, que tengan buena reflexión y que además la fase sea estable en el tiempo, con el objetivo de poder disponer de píxeles coherentes en largos intervalos. El objetivo será estimar con precisión los movimientos de dichos píxeles coherentes una vez cancelados los artefactos atmosféricos.

Para ello se instalaron sobre el terreno un total de 16 *Corner Reflectors* (figura 72): triedros metálicos que funcionan como reflectores ideales, y que complementarán aquellos reflectores naturales si los hay. Estos elementos nos proporcionarán los píxeles coherentes necesarios sobre los cuales calcularemos los desplazamientos.

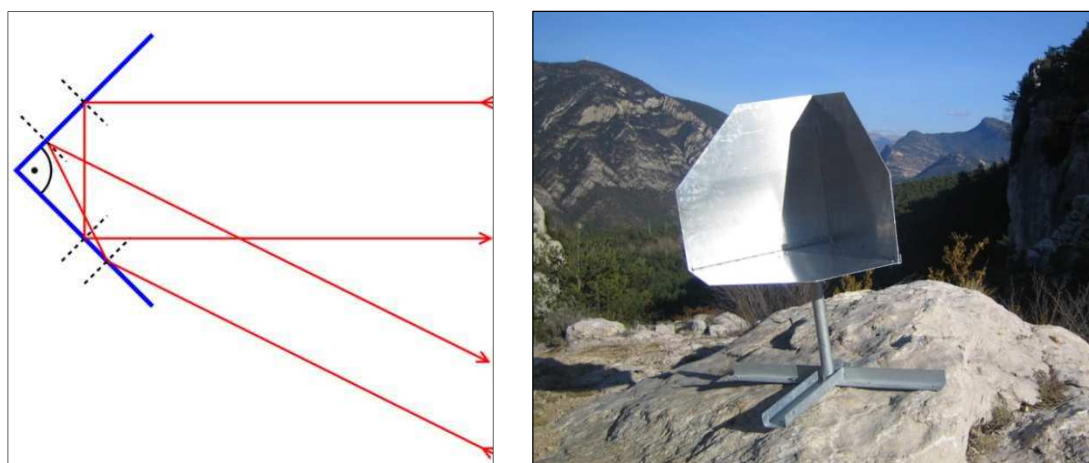


Figura 72. (a) Principio de funcionamiento de un corner reflector. (b) Corner reflector real instalado en Vallcebre.

De los datos de fase medidos a lo largo de la campaña tan solo se ha podido aprovechar una parte, dado que la respuesta de los *corner reflectors* no es aprovechable en varios días por la fuerte nevada caída sobre la zona, que produce una respuesta sobre el GB-SAR que no sigue ningún patrón concreto y no es modelable (efecto de difracción atmosférica). Por ello finalmente se estudian los observables medidos desde las 15,02 h del 21/11/2010 hasta las 23,58 h del 29/11/2010 (8 días y medio aproximadamente).

En la tabla 15 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos mediante el software IBIS-L (software propio del sensor GB-SAR empleado), en el que se muestran los desplazamientos medidos a diversos puntos a lo largo del tiempo, tomando como origen el 21/11/2010 a las 15:02 h, instante en el que consideramos que no existe desplazamiento.

	P1 [mm]	P2 [mm]	P3 [mm]	P4 [mm]
	[-2,5m, 571,0m]	[122,1m, 744,1m]	[-26,8m, 677,0m]	[-175,9m, 629,4m]
21/11/2010 15:02	0	0	0	0
21/11/2010 15:08	-0,031263	0,093016	-0,088575	0,182435
21/11/2010 15:15	-0,053492	0,264345	-0,010466	-0,029828
21/11/2010 15:21	0,579329	0,786962	0,683564	0,480766
21/11/2010 15:27	0,817911	1,267181	0,973892	0,827354
21/11/2010 15:33	0,519406	1,046037	0,715716	0,670608
21/11/2010 15:40	0,401971	1,074422	0,642018	0,620337
21/11/2010 15:46	1,280076	1,927784	1,587276	1,446332
21/11/2010 15:52	1,531742	2,190563	1,69712	1,632818
21/11/2010 15:58	1,899027	2,862349	2,208039	2,124556
21/11/2010 16:05	1,937097	2,95846	2,359158	2,244994

Tabla 15. Resultados de fase brutos obtenidos mediante IBIS-L a diversos corner reflectors de la ladera de Vallcebre. Fuente: Institut de Geomàtica.

En la figura 73 se muestra la evolución de la fase para los *corner reflectors* CR5, CR7 y CR17 a lo largo de todo el intervalo de tiempo estudiado. En la figura 74 se muestra la evolución de la fase de todos *corner reflectors* de la ladera.

Paralelamente a dicha campaña de observación GB-SAR en continuo se instalaron 3 sensores de temperatura y humedad en 3 *corner reflectors* situados a diferentes distancias. Un ejemplo de los resultados brutos medidos por uno de los sensores puede verse en la tabla 16.

EasyLog USB#2	Time	Celsius (°C)	Humidity (%rh)	dew point (°C)
211	21/11/2010 15:02	12,5	57	4,2
212	21/11/2010 15:07	12,5	55,5	3,8
213	21/11/2010 15:12	12,5	56	4
214	21/11/2010 15:17	12,5	58,5	4,6
215	21/11/2010 15:22	12	59	4,2
216	21/11/2010 15:27	11,5	60,5	4,1
217	21/11/2010 15:32	12	60,5	4,6
218	21/11/2010 15:37	12,5	58	4,5
219	21/11/2010 15:42	12,5	59	4,7
220	21/11/2010 15:47	11,5	61	4,3
221	21/11/2010 15:52	11	63	4,2
222	21/11/2010 15:57	10,5	67	4,6

Tabla 16. Resultados de temperatura, humedad relativa y punto de rocío medidos mediante sensores al CR5. Fuente: Institut de Geomàtica.

Toda la serie de observables para el periodo de tiempo estudiado se encuentran en la figura 75 (humedad relativa) y la figura 76 (temperatura).

La presión atmosférica es el término que menos afecta en el cálculo del retardo atmosférico, por lo que no se requiere una gran precisión y nos basta con una aproximación. Por ello no ha sido medida en campo y ha sido extraída de la estación meteorológica de Guardiola de Berguedà, a unos 4 km de distancia de la ladera de Vallcebre. Aunque la estación meteorológica no está propiamente sobre la superficie de la ladera, si que se encuentra en el área de influencia de la misma.

Un ejemplo de los datos extraídos de dicha estación se puede ver en la tabla 17.

Tiempo	Presión (hPa)
21/11/2010 (00:00-01:00)	1007,7
21/11/2010 (01:00-02:00)	1008,0
21/11/2010 (02:00-03:00)	1007,1
21/11/2010 (03:00-04:00)	1007,2
21/11/2010 (04:00-05:00)	1007,3
21/11/2010 (05:00-06:00)	1007,4
21/11/2010 (06:00-07:00)	1006,4

Tabla 17. Datos de presión atmosférica medidas en la estación meteorológica de Guardiola de Berguedà. Fuente: Servei Meteorològic de Catalunya.

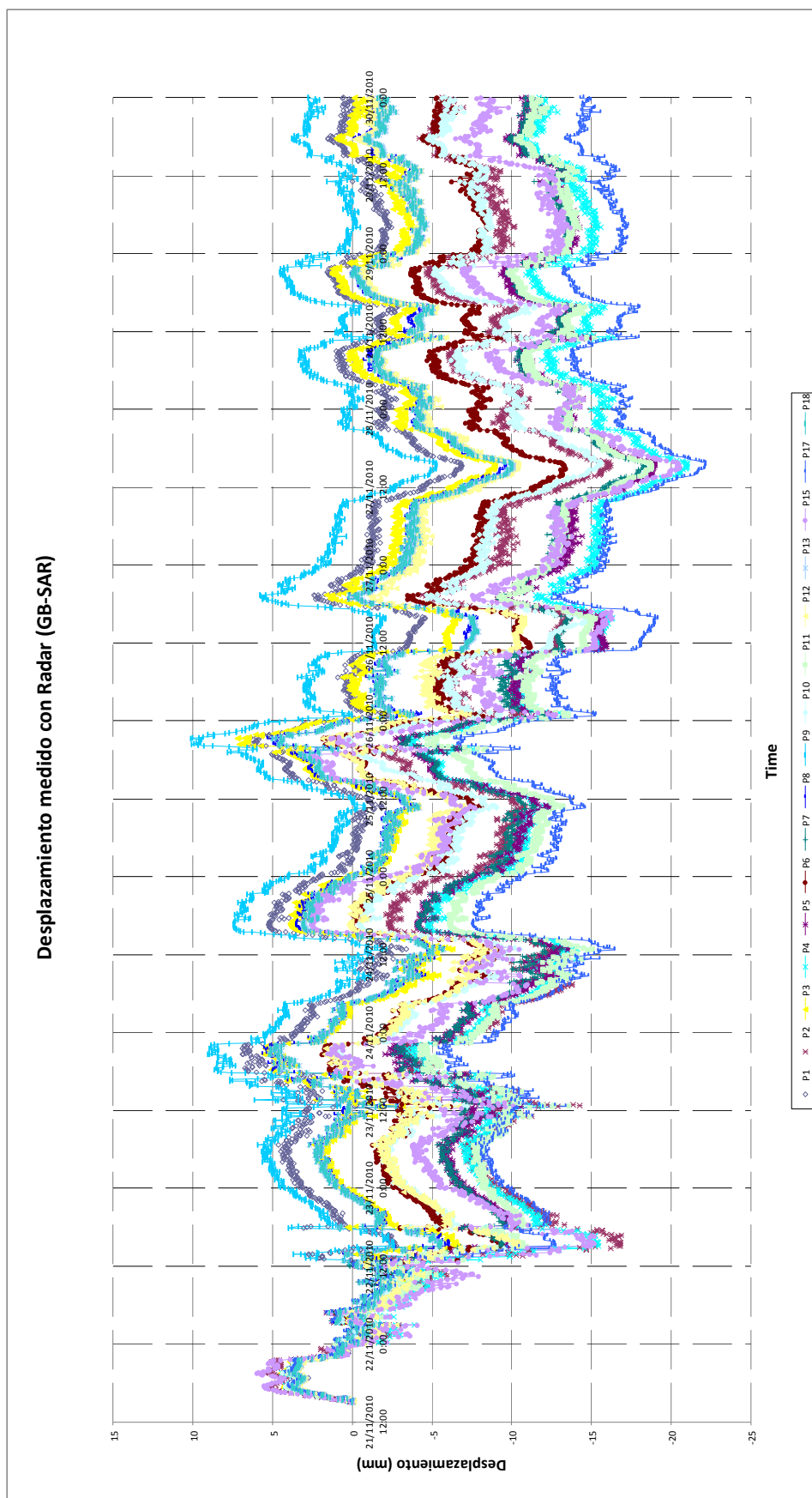


Figura 73. Desplazamientos medidos con GB-SAR. Como se aprecia, no se corresponde a un desplazamiento de ladera. La fase está fuertemente afectada por la atmósfera. Fuente: Institut de Geomàtica.

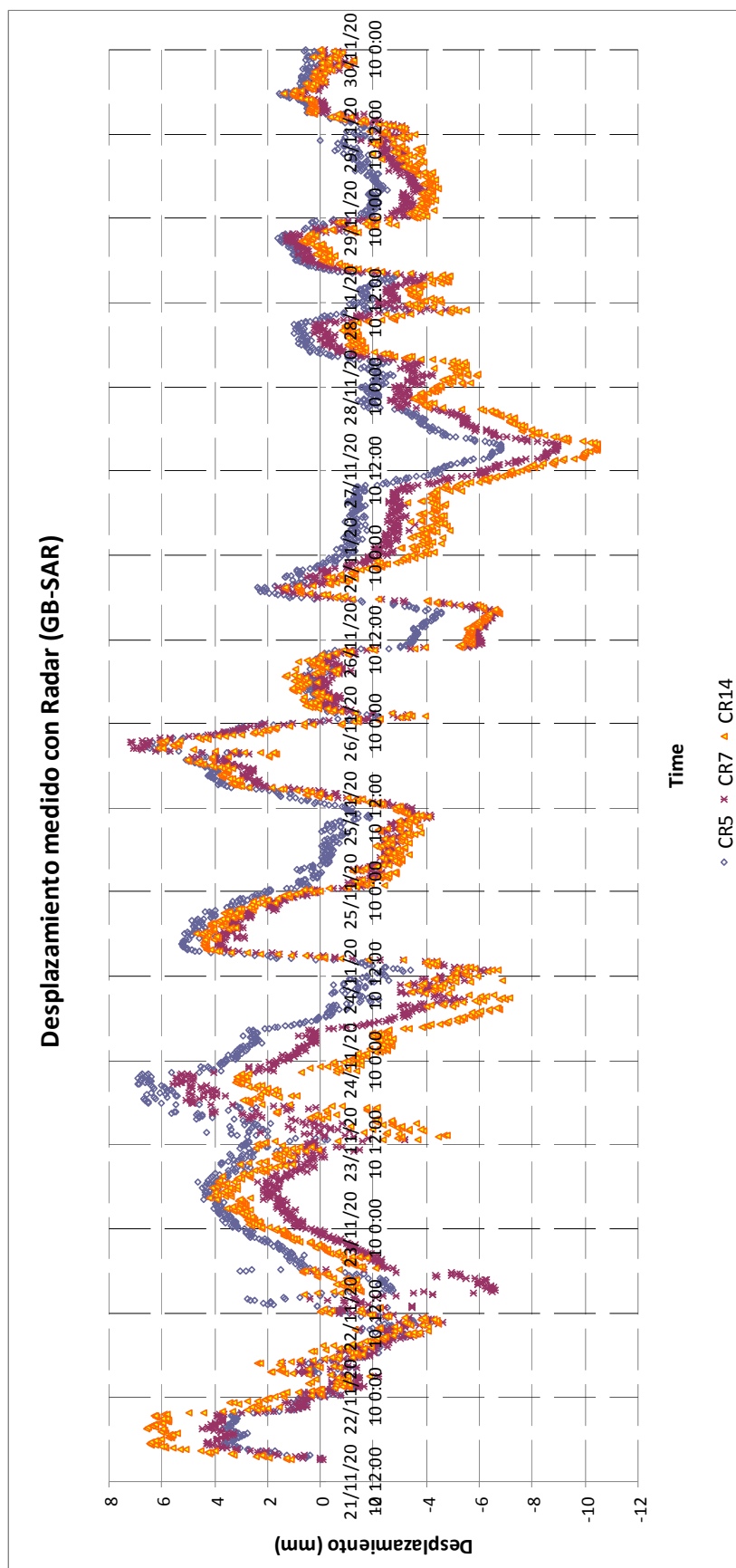


Figura 74. Desplazamientos medidos con GB-SAR. Como se aprecia, no se corresponde a un desplazamiento de ladera. La fase está fuertemente afectada por la atmósfera. Fuente: Institut de Geomàtica.

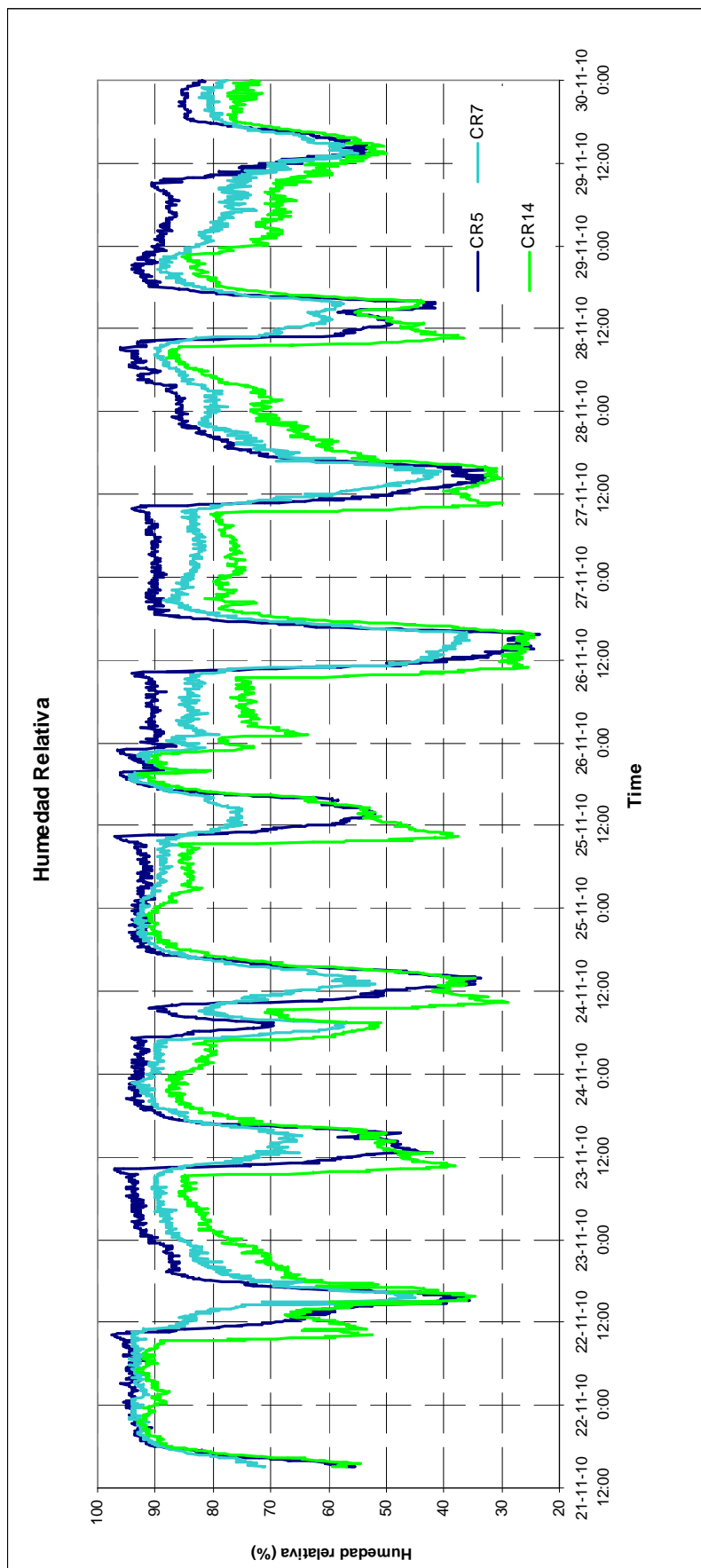


Figura 75. Resultados humedad relativa medidos mediante sensores en cada CR considerado.
Fuente: Institut de Geomàtica.

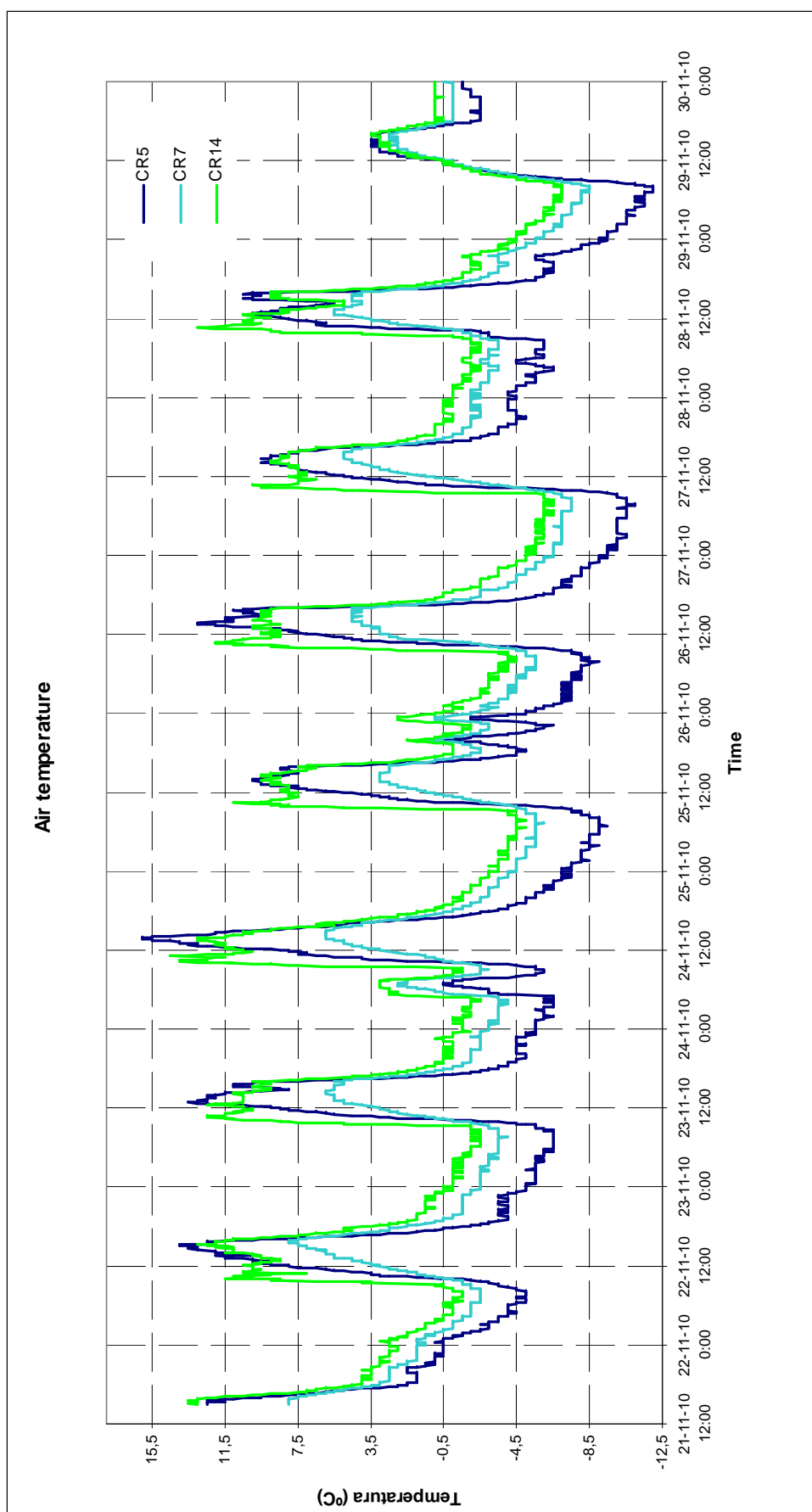


Figura 76. Resultados de temperatura medidos mediante sensores en cada CR considerado.
Fuente: Institut de Geomàtica.

Por otro lado superponemos la temperatura y la humedad relativa para cada *corner reflector*:

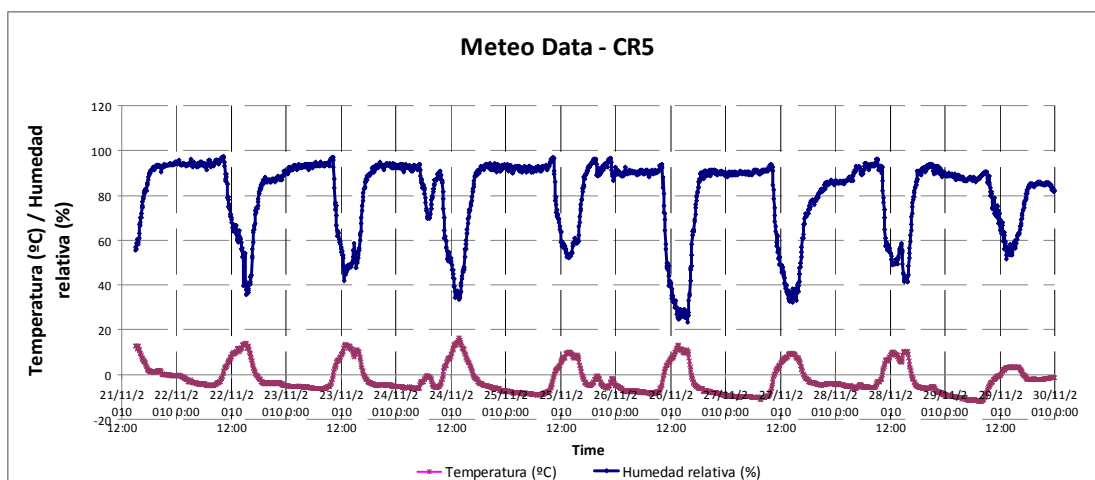


Figura 77. Resultados de temperatura y humedad medidos en el CR5. Fuente: Institut de Geomàtica.

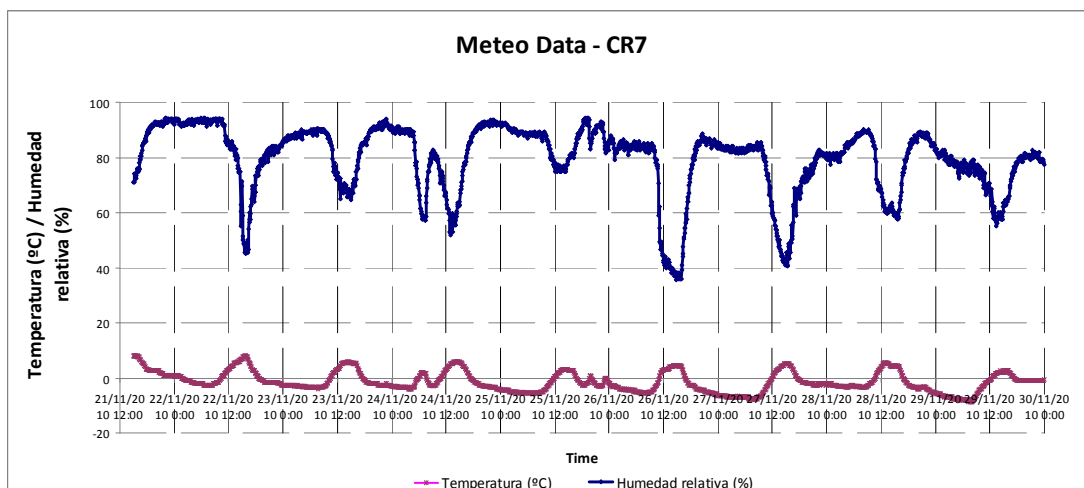


Figura 78. Resultados de temperatura y humedad medidos en el CR7. Fuente: Institut de Geomàtica.

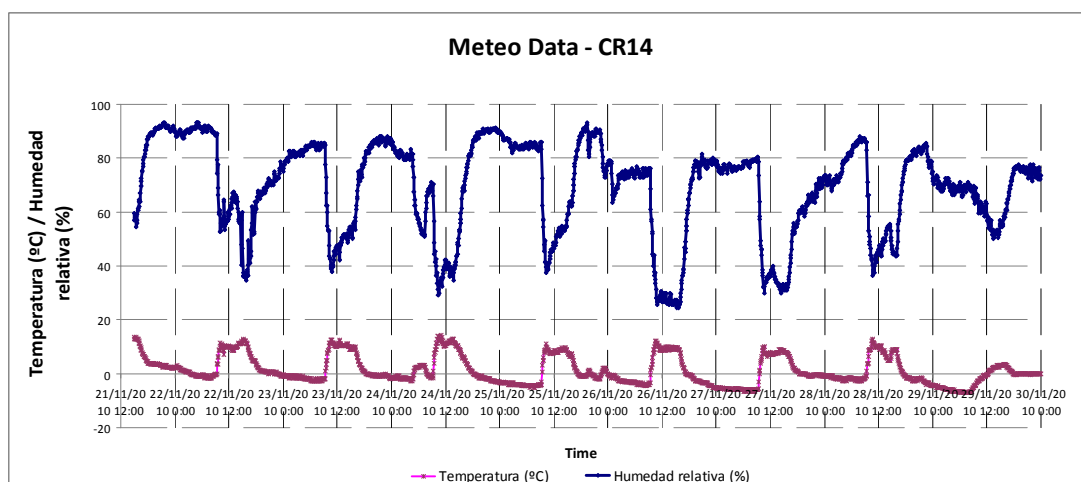


Figura 79. Resultados de temperatura y humedad medidos en el CR14. Fuente: Institut de Geomàtica.

4. OBSERVACIONES GB-SAR EN CONTINUO: APLICACIÓN DE UN MODELO ATMOSFÉRICO A PARTIR DE DATOS METEOROLÓGICOS MEDIDOS EN CAMPO.

4.1. OBTENCIÓN DE LOS DESPLAZAMIENTOS APARENTES CON LA METEO DATA.

En este caso aplicamos un modelo genérico [35] para preveer el retardo atmosférico de la fase para un blanco estable p y para unas condiciones meteorológicas medidas: temperatura, presión atmosférica y humedad relativa. La temperatura y la humedad relativa las medimos a través de sensores (figura 71), que registran dichos datos en continuo (apartado anterior). La presión atmosférica la tomamos de una estación meteorológica cercana, la de Guardiola de Berguedà, a unos 4 km de la ladera de estudio, considerando que ésta se encuentra en la misma área de influencia de la ladera y que además la presión a penas afecta sobre el modelo, siendo las variables que influyen fuertemente la humedad y la temperatura. El objetivo será el de obtener una estimación del retardo atmosférico a lo largo de todos los días que hemos tomado datos atmosféricos con dichos sensores, concretamente 8,5 días.

La expresión que según [35] define el retardo/avance atmosférico es:

$$d_{atm,p}(i) = 10^{-6} \int_0^{L_p} N(\vec{r}(\vec{l}), i) dl \quad [35]$$

Que es función de la refractividad atmosférica N , el espacio \vec{r} y el tiempo. L_p es la distancia entre el radar y el blanco o *target*.

Como se aprecia, el retardo atmosférico d_{atm} es función de la refractividad atmosférica (integral de la misma a lo largo de todas las capas de la atmósfera que atraviesan las señales), pero ésta es función de la temperatura, presión y humedad: $N(P, T, Hr)$. Dado que únicamente disponemos de esos datos para la posición del blanco, consideramos N constante a lo largo de toda la masa de aire o trayectoria que atraviesan las señales. Asimismo hay que tener presente que los sensores se sitúan cerca del suelo, cosa que hace variar ligeramente el valor de la humedad y la temperatura respecto a puntos alejados del suelo. Se sobreestima la humedad y además el sensor puede estar al sol durante ciertos momentos del día, pudiendo registrar una temperatura sobreestimada respecto a la temperatura real del aire. Adoptando la hipótesis de N constante para cada *target*, el resultado es:

$$d_{atm,p}(i) = 10^{-6} \times N(i) \times L_p(i) \quad [35]$$

Donde calculamos la refractividad N como:

$$N = 77,6890 \frac{p_d}{T} + 71,2952 \frac{p_w}{T} + 375463 \frac{p_w}{T^2} \quad [67]$$

Donde p_w es presión parcial de vapor húmeda (en hPa o mbar), p_d es la presión parcial de vapor seca (en hPa o mbar) y T la temperatura (en Kelvin). Las expresiones son las siguientes:

$$p_w = \frac{Hr}{100} \times P_{V,sat} \quad [67]$$

$$p_d = p_{atm} - p_w \quad [67]$$

$$P_{V,sat} = \theta^5 \times e^{(23,905-22,644 \times \theta)} \quad [\text{kPa}] \quad [67]$$

$$\theta = 300/T(^{\circ}\text{K}) \quad [67]$$

Finalmente calculamos el retardo atmosférico tomando como referencia $d_{atm,p}(1) = 0$, es decir, consideramos nulo el retardo atmosférico para un momento de referencia escogido a priori, de modo que el resultado obtenido finalmente es:

$$\Delta d_{atm} = 10^{-6} \times L_p \times (N(i) - N(1)) \quad [35]$$

Time	Celsius(°C)	Humidity (%rh)	p (hPa)	Pv,Sat (hPa)	pw (hPa)	N	Δd_{atm}
21/11/2010 12:36	17	63,5	1006	19,344	12,28395	323,862	0,0079
21/11/2010 12:41	17	64	1006	19,344	12,38068	324,291	0,0082
21/11/2010 12:46	17,5	64	1006	19,967	12,77898	325,400	0,0089
21/11/2010 12:51	18	64	1006	20,607	13,18848	326,549	0,0096
21/11/2010 12:56	18,5	64	1006	21,265	13,60942	327,738	0,0104
21/11/2010 13:01	18,5	64	1000	21,265	13,60942	326,139	0,0094
21/11/2010 13:06	19	64	1000	21,941	14,04209	327,372	0,0102
21/11/2010 13:11	19,5	64	1000	22,636	14,48675	328,647	0,0110
21/11/2010 13:16	20	64	1000	23,349	14,94368	329,965	0,0119

Tabla 18. Ejemplo de datos tomados por un sensor y cálculo de Δd_{atm} , tomando como referencia temporal $\Delta d_{atm} = 0$ el 21/11/2010 a las 15:02. Fuente: Institut de Geomàtica.

Podemos transformar Δd_{atm} a incremento de fase a partir de la siguiente conversión:

$$\Delta\phi = \Delta d_{atm} \frac{2\pi}{\lambda}$$

Donde en nuestro caso $\lambda \approx 1,8 \text{ cm}$. Para que todo tenga sentido es necesario evitar enrollamientos de fase (*aliasing*), por lo que como mucho $\Delta\phi < \pi \text{ rad}$ (o $\Delta d_{atm} < \lambda/2 = 9 \text{ mm}$). Independientemente a lo expuesto el propio software desenrolla la fase, de modo que en nuestro caso no va suponer un problema: los desplazamientos obtenidos con IBIS-L son los correctos y estas libres de enrollamiento de fase.

Aplicando el modelo citado llegamos a unos resultados de desplazamiento “aparente” debido a artefactos atmosféricos para cada *corner reflector* donde se hayan situado dichos sensores de temperatura y humedad. Un ejemplo se puede ver en la tabla 18. Finalmente generamos el modelo para los 8,5 días de los cuales disponemos datos meteorológicos medidos en campo. Los resultados de aplicar dicho modelo se representan en la figura 80.

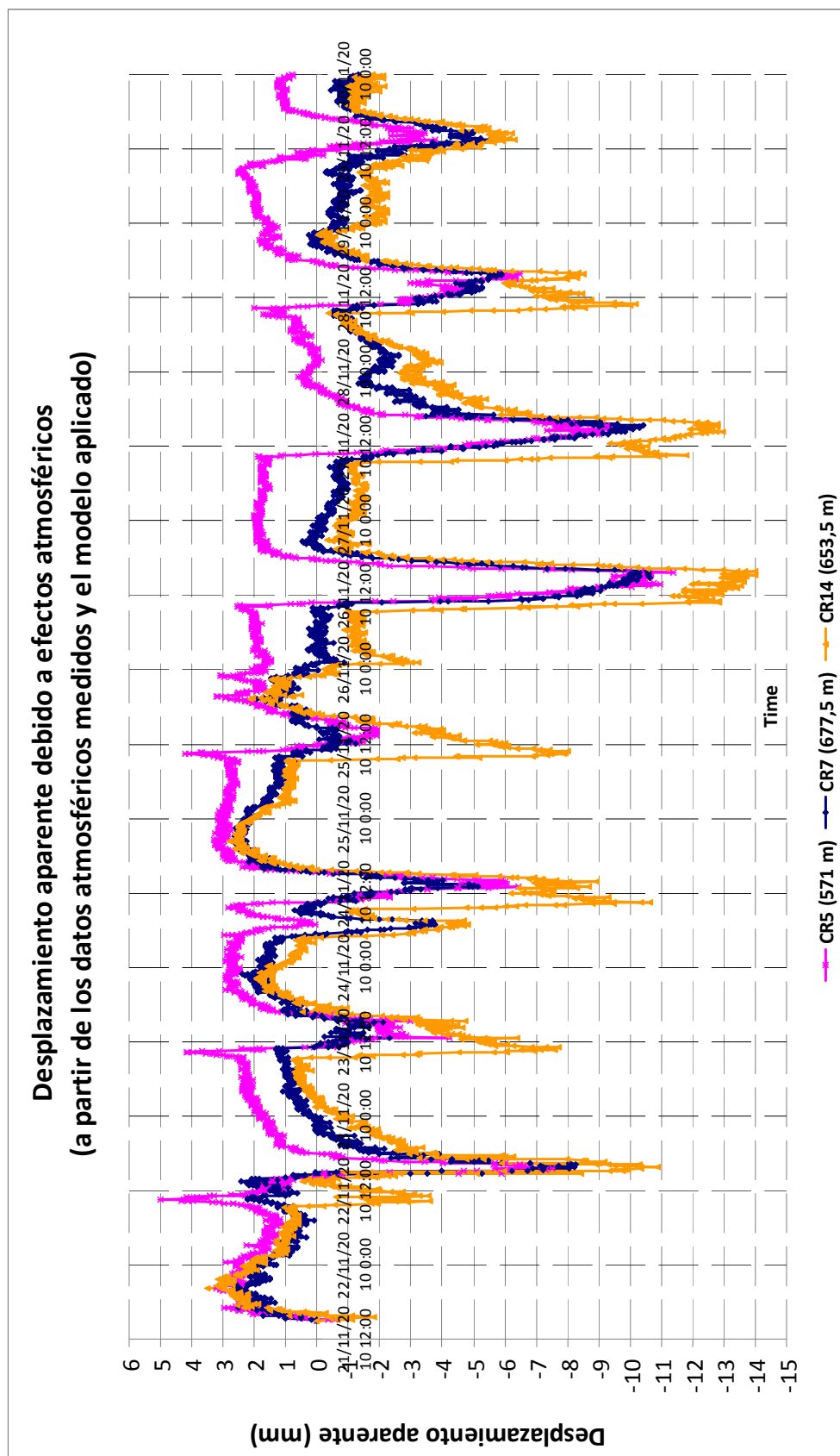


Figura 80. Resultado de la aplicación del modelo atmosférico propuesto con los datos atmosféricos medidos sobre cada CR (temperatura, humedad y presión atmosférica). Como se aprecia, al igual que ocurre con los datos de fase medidos con GBSAR, los períodos nocturnos presentan una mayor estabilidad que los períodos diurnos. Fuente: Institut de Geomàtica.

4.2. COMPARACIÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTOS MEDIDOS CON GB-SAR Y LOS OBTENIDOS MEDIANTE EL MODELO ATMOSFÉRICO APLICADO.

En los apartados anteriores se ha llevado a cabo la obtención de desplazamientos mediante dos técnicas. En primer lugar se han obtenido dichos desplazamientos a partir de las observaciones realizadas con el equipo GB-SAR, observaciones que han arrojado unos desplazamientos fundamentalmente debidos a efectos atmosféricos, pero hay que tener en cuenta que dichos CR's se encuentran en zona no estable, por lo que además de la componente atmosférica, que es la predominante, también existe otra componente de desplazamiento real de la ladera, aunque en este caso se sabe de ante mano que va a ser muy pequeña dada la ausencia de lluvias a lo largo de todo el período de observación.

Por otro lado se han obtenido desplazamientos a partir de la aplicación de un modelo atmosférico sencillo (ver apartado anterior). En este caso se sabe que el desplazamiento aparente que arroja como resultado es únicamente el debido a efectos atmosféricos, y en ningún caso tiene en cuenta el desplazamiento real de la ladera. Es por ello especialmente interesante poder llegar a caracterizar la atmósfera con precisión con el fin de corregir la fase de la imagen de efectos atmosféricos, quedando únicamente el valor de la fase debido al movimiento real de la ladera. Si logramos superar esta fase con precisión podremos finalmente obtener sin problema los desplazamientos reales de los diferentes blancos. No obstante se verá que no es algo sencillo y que los resultados obtenidos aplicando dicha técnica nos conducen a resultados de precisión intermedia. Resulta muy complejo 'cancelar' los artefactos atmosféricos mediante el modelo generado a partir de los datos meteorológicos medidos en campo.

En las figuras 81, 82 y 83 se muestra la superposición del desplazamiento aparente obtenido mediante la aplicación del modelo atmosférico presentado en el apartado anterior y el desplazamiento obtenido a partir de las observaciones GB-SAR.

Calculamos la desviación estándar y la media en la variabilidad de desplazamiento aparente cada caso, tal y como se muestra en la tabla 19. Para calcular la media se ha considerado que el "0" de desplazamiento se encuentra en el punto de mayor desplazamiento negativo en cada caso, de tal forma que todos los valores sean positivos y así obtener resultados relacionados con la variabilidad total del tren de datos, independientemente de su signo (figuras 81, 82 y 83).

	GB-SAR			Modelo Atmosférico		
	CR5	CR7	CR14	CR5	CR7	CR14
Media (mm)	7,13	7,82	9,10	11,94	9,86	11,72
Desviación estándar (mm)	2,68	2,94	3,41	2,74	2,60	3,72

Tabla 19. Media y desviación estándar de los desplazamientos para cada CR y para los datos medidos con GB-SAR y el modelo atmosférico resultante.

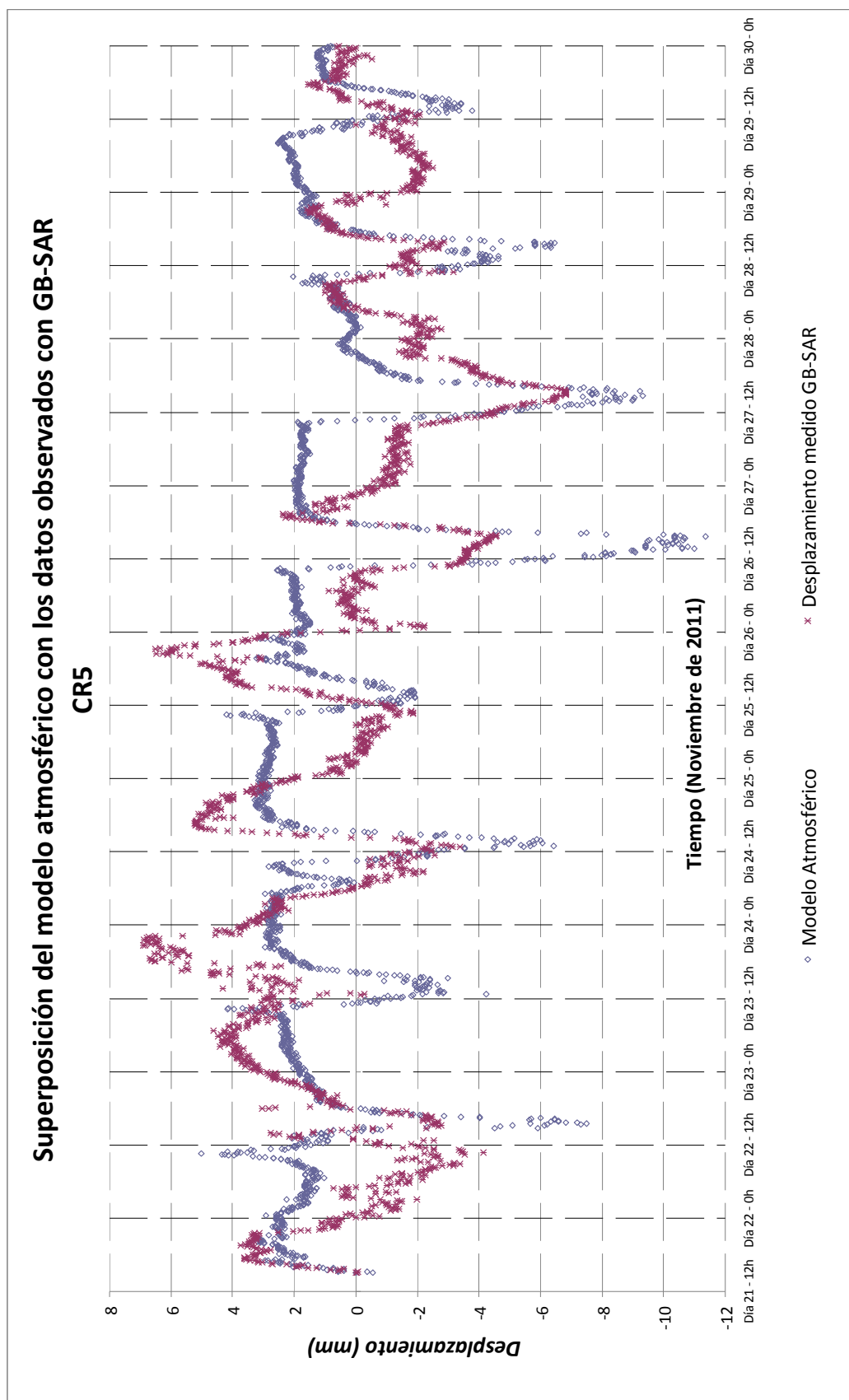


Figura 81. Superposición del desplazamiento aparente obtenido mediante la aplicación del modelo atmosférico y el desplazamiento obtenido a partir de las observaciones GB-SAR.

Fuente: Institut de Geomàtica.

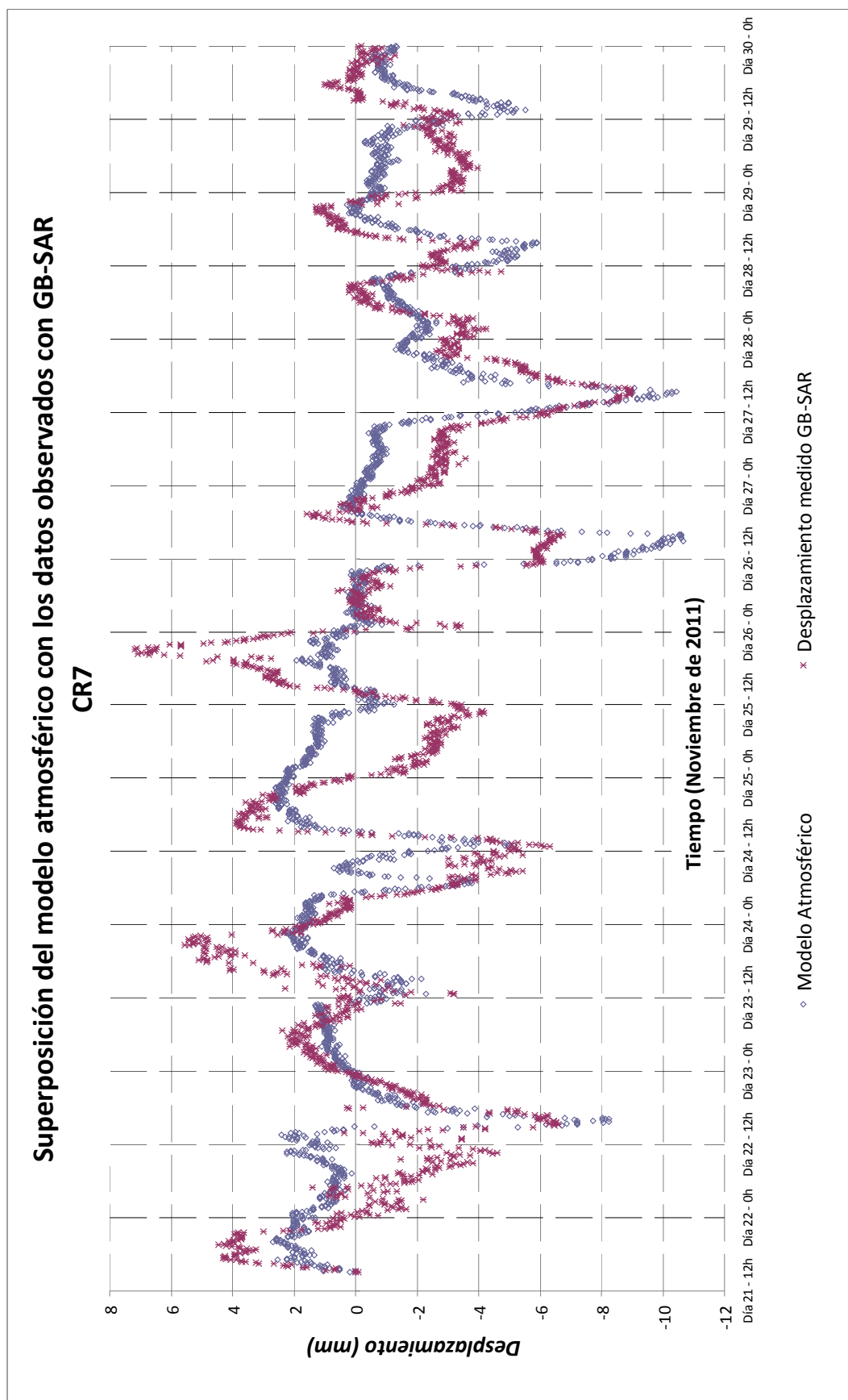


Figura 82. Superposición del desplazamiento aparente obtenido mediante la aplicación del modelo atmosférico y el desplazamiento obtenido a partir de las observaciones GB-SAR.

Fuente: Institut de Geomàtica.

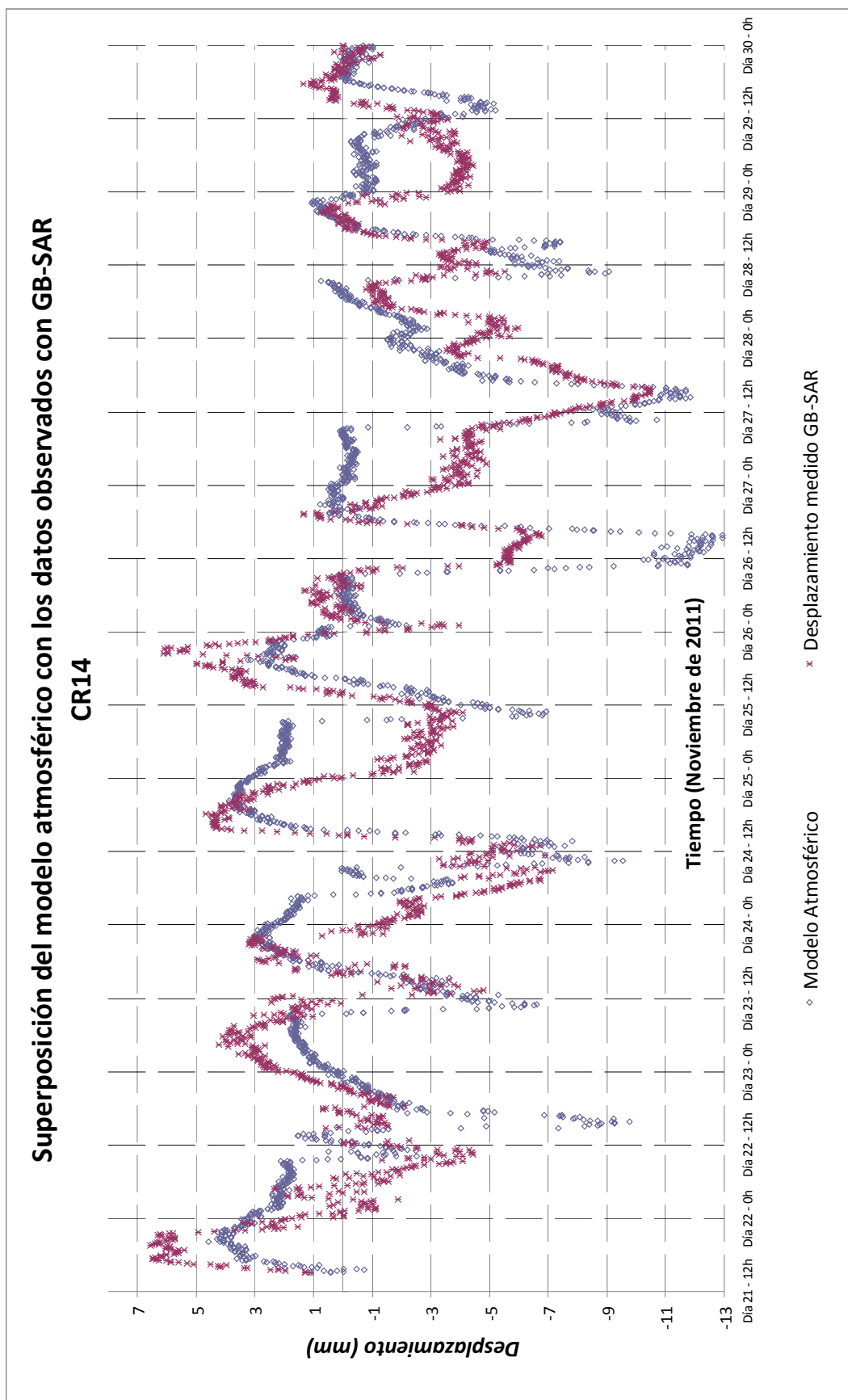


Figura 83. Superposición del desplazamiento aparente obtenido mediante la aplicación del modelo atmosférico y el desplazamiento obtenido a partir de las observaciones GB-SAR.

Fuente: Institut de Geomàtica.

4.3. CONCLUSIONES.

a) Como se observa en los datos meteorológicos brutos para cada CR (figuras 77, 78 y 79), al aumentar la humedad disminuye la temperatura y viceversa. Además la tendencia de la humedad y la temperatura a lo largo del tiempo es similar en los tres CR's (figuras 75 y 76). Estas dos cuestiones nos llevan a la conclusión de que no existen errores groseros en la medida por parte de los tres sensores, al registrar comportamientos similares de humedad y temperatura para cada CR a lo largo del tiempo. Es una primera validación de que las mediciones de los sensores son correctas y que ninguno de ellos registra anomalías. Además se puede apreciar claramente la periodicidad del tren de datos (12/24 horas).

b) En cuanto a los desplazamientos medidos con GB-SAR se observa que el tren de datos para cada CR sigue una tendencia similar (figuras 73 y 74). Ello es, como en el caso anterior, una primera validación de que las mediciones realizadas con GB-SAR son coherentes entre sí, dado que se registra un comportamiento similar en todos los casos: ha de ser así dado que todos los CR's son blancos estables muy cercanos, y por lo tanto el comportamiento ha de ser similar para todos. También se observa que en general los desplazamientos aparentes medidos con GB-SAR son mayores cuanto mayor es la distancia que atraviesan las ondas radar a través de la atmósfera desde el sensor hasta el blanco (figura 84): mayor retardo atmosférico a mayor distancia del sensor GB-SAR al CR. El desplazamiento aparente debido a artefactos atmosféricos es directamente proporcional a la distancia que separa el sensor del blanco. En el siguiente apartado se empleará esta característica para ajustar una función que determine el desplazamiento debido a artefactos atmosféricos en función de la distancia sensor-blanco para finalmente obtener imágenes 'libres de atmósfera'.

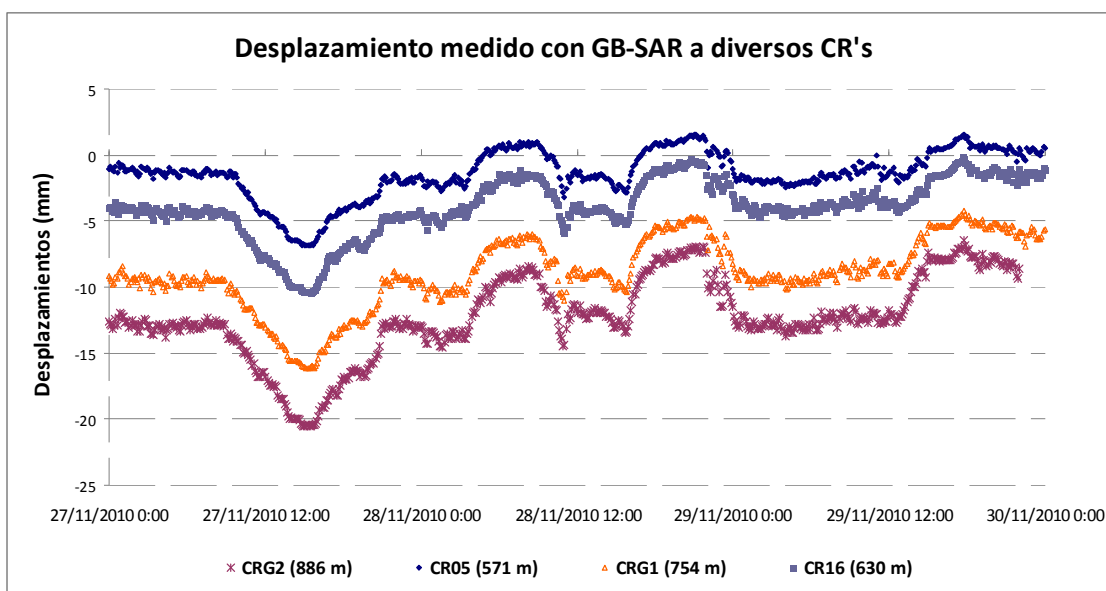


Figura 84. Desplazamiento medido con GB-SAR a diversos CR's. Se puede comprobar que el desplazamiento medido, que fundamentalmente se corresponde a efectos atmosféricos, es mayor cuanto mayor es la distancia entre el sensor GB-SAR y cada CR. Por tanto se corrobora que el desplazamiento aparente debido a artefactos atmosféricos es directamente proporcional a la distancia que separa el sensor de cada blanco estudiado. Fuente: Institut de Geomàtica.

c) Como se observa en las gráficas que superponen los modelos atmosféricos y las mediciones del GB-SAR (figuras 81, 82 y 83), el comportamiento medido con GB-SAR tiene una fuerte correlación con los resultados del modelo atmosférico. Se puede asegurar que el comportamiento de la fase medida se corresponde con los artefactos atmosféricos (al propagarse las señales por la troposfera), y no con otros fenómenos. Asimismo podemos asegurar que el modelo aplicado funciona correctamente y no presenta anomalías.

d) La diferencia entre el desplazamiento obtenido con GB-SAR y el modelo (el residuo), es siempre inferior a 9 mm, es decir, inferior a 2π en términos de fase, motivo por el cual deducidos que no existe enrollamiento de fase de los datos GB-SAR que estamos empleando: el software IBIS-L ha desenrollado la fase correctamente, algo que no siempre es así. El residuo debe ser inferior a 2π para que la comparativa tenga sentido.

e) A pesar de lo expuesto, el grado de precisión en la caracterización atmosférica **no** es suficiente para “cancelar” los artefactos atmosféricos que afectan a las imágenes y poder obtener finalmente imágenes ‘libres de atmósfera’, paso previo y necesario a la obtención del valor del desplazamiento con la precisión deseada, que debe ser al menos milimétrica. **No aplicamos el modelo sobre el resto de CR's dado que el resultado de aplicar dicho modelo no es suficientemente preciso: no se llegaría a obtener imágenes ‘libres de atmósfera’.**

f) Existe una fuerte correlación entre el desplazamiento medido con GB-SAR y el obtenido aplicando el modelo atmosférico (figuras 81, 82 y 83). No obstante, aunque la correlación es fuerte en cuanto a la tendencia del tren de datos a lo largo del tiempo, no lo es en cuanto a la magnitud de los resultados: el modelo sobreestima en términos generales el retardo atmosférico. Ello es debido a que la humedad está sobreestimada en todos los casos, ya que el sensor empleado para su medición se encuentra a ras de suelo, por lo que se registran humedades mayores a las reales. Por proponer un ejemplo, reducimos la humedad un 20% de su valor en el caso del CR5 (figuras 85 y 86); se aprecia claramente que el modelo se ajusta más a la realidad medida por el GB-SAR al reducir el valor de la humedad relativa.

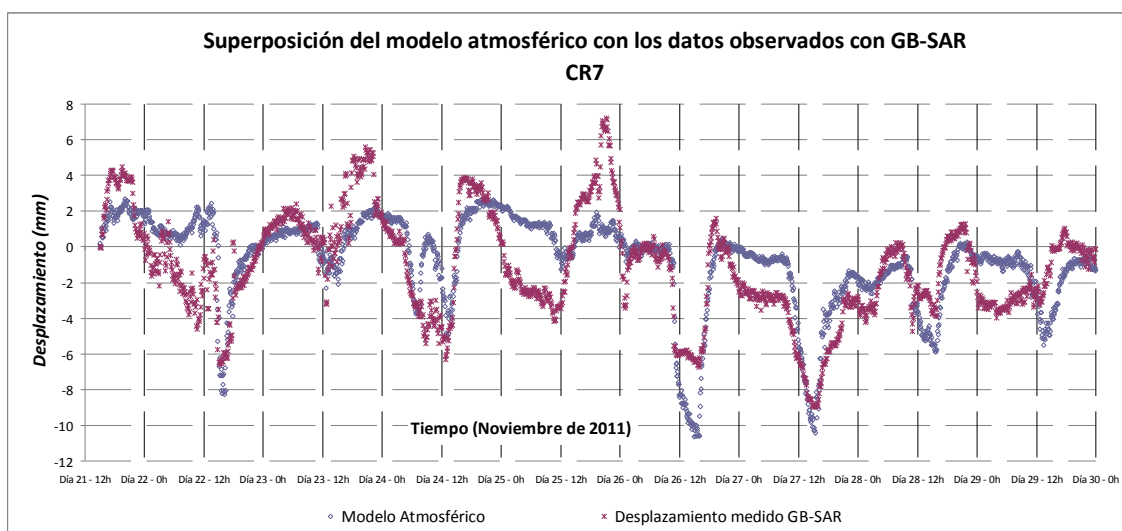


Figura 85. Superposición del desplazamiento aparente obtenido mediante la aplicación del modelo atmosférico y el desplazamiento obtenido a partir de las observaciones GB-SAR.

Fuente: Institut de Geomàtica.

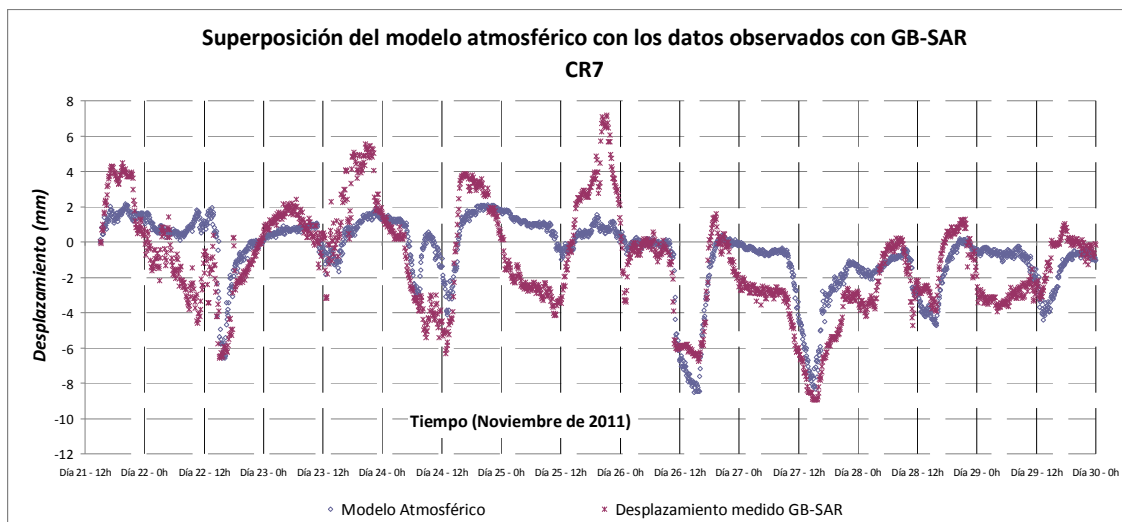


Figura 86. Superposición del desplazamiento aparente obtenido mediante la aplicación del modelo atmosférico reducido (reducción de la humedad un 20%) y el desplazamiento obtenido a partir de las observaciones GB-SAR. Fuente: Institut de Geomàtica.

g) Es difícil caracterizar con precisión el comportamiento atmosférico empleando un solo sensor junto al blanco (CR) y considerar la refractividad N constante a lo largo de toda la masa de aire que atraviesan las señales radar; tenemos un solo valor de refractividad N que no es suficientemente representativo para caracterizar la atmósfera con precisión. Además colocar dichos sensores a ras de suelo nos lleva a una sobreestimación de la humedad (y por lo tanto sobreestimación de Δd_{atm}), así como una sobreestimación la temperatura del aire cuando toca el sol de forma directa sobre el sensor en determinados momentos del día (a pesar de que el sensor se coloca cuidadosamente para que esto no ocurra). Todo ello nos lleva a modelos atmosféricos resultantes a partir de los cuales es posible cancelar parcialmente el efecto atmosférico pero siguen habiendo residuos de magnitud considerable (hasta de 6 o 7 milímetros en nuestro caso), por lo que emplear dichos modelos atmosféricos para obtener imágenes 'libres de atmósfera' no es una vía adecuada si queremos medir pequeños desplazamientos.

h) Se aprecia que en todos los casos el promedio de los desplazamientos del modelo es superior al promedio de los desplazamientos medidos con GB-SAR (tabla 19). Ello implica que en general existe una sobreestimación de los desplazamientos del modelo atmosférico, probablemente a causa de la sobreestimación de la humedad (ver apartados f) y g)). Por otro lado la desviación estándar es parecida en ambos casos (dispersión de datos similar en ambos casos).

5. OBTENCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN OBSERVACIONES GB-SAR EN CONTINUO. CARACTERIZACIÓN DE LA ATMÓSFERA AJUSTANDO FUNCIONES LINEALES Y CUADRÁTICAS.

5.1. AJUSTE DE UN MODELO A PARTIR DE PUNTOS FIJOS SOBRE LA LADERA.

El objetivo en este caso es llegar a obtener imágenes 'libres de atmósfera', es decir, imágenes en las que la componente atmosférica quede anulada (salvo posibles residuales), y toda la fase esté asociada a la componente topográfica, por tal de obtener desplazamientos diferenciando entre imágenes SAR corregidas tomadas en instantes diferentes.

5.1.1. Estudio de puntos fijos sobre la ladera.

Para poder llegar a los objetivos planteados es necesario situar puntos estables sobre la ladera y asegurarse de que realmente lo son. Según se muestra en la figura 87 tenemos diversos puntos que muestran elevada coherencia y que se corresponden con *corner reflectors* (círculos rojos). De acuerdo con las medidas topográficas los CR's que se encuentran dentro de la línea verde se encuentran en el área en movimiento.

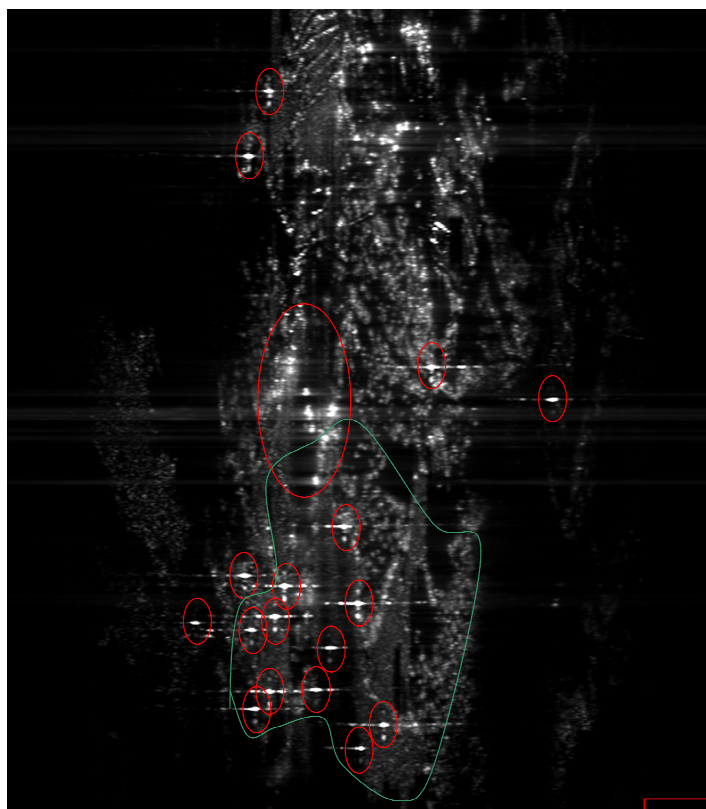


Figura 87. Imagen de coherencia en la que se muestran los diversos corner reflectors (círculos rojos). Todos los CR's que se encuentran en el interior de la línea verde son CR's que se encuentran en el área en movimiento de la unidad inferior de la ladera. Fuente: Institut de Geomàtica.

En el caso de Vallcebre se ha hecho un estudio de puntos supuestamente fijos sobre la ladera mediante técnicas topográficas. En las diversas campañas topográficas se ha estacionado sobre el mismo punto y se ha medido la distancia geométrica a varios blancos situados sobre la ladera (figuras 63, 64 y 66). En la tabla 20 se muestra un histórico de dichas mediciones topográficas a diversos puntos estables de la ladera (PZE-1, PZE-2, PZE-3, PZE-4 y CR14), que se representa gráficamente en las figuras 88, 89, 90, 91 y 92.

	21/04/2010	21/07/2010	16/09/2010	13/10/2010	11/11/2010	19/01/2011	04/04/2011
PZE-1	556,613	556,611	556,611	556,612	556,611	556,608	556,613
PZE-2	509,059	509,056	509,058	509,053	509,058	509,058	509,062
PZE-3	482,698	482,696	482,696	482,696	482,698	482,699	482,703
PZE-4	456,410	456,409	456,407	456,412	456,408	456,407	456,416
CR14	524,487	524,478	524,487	524,480	524,484	524,481	524,487

Tabla 20. Histórico de mediciones topográficas a diversos puntos de la ladera. Se muestran las distancias geométricas medidas a los puntos que se detallan. Fuente: Institut de Geomàtica.

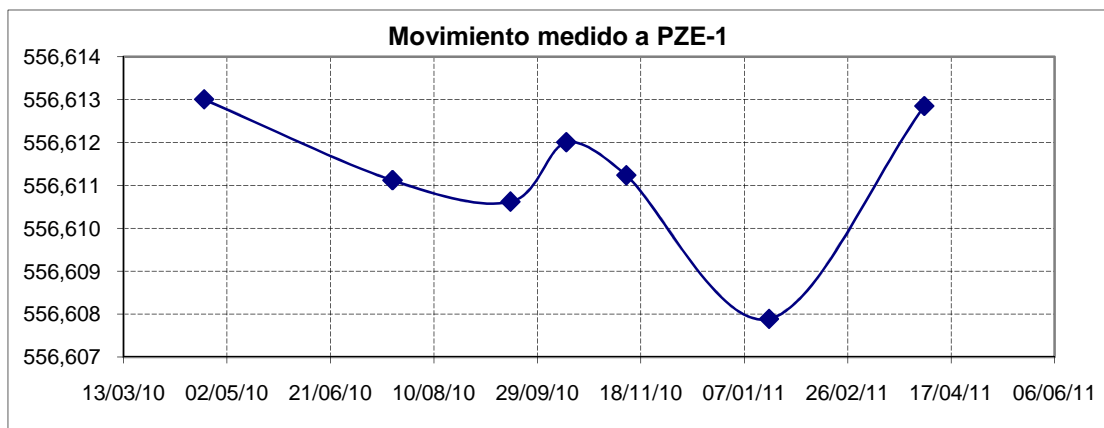


Figura 88. Promedio de la distancia medida = 556,511 m. Desviación estándar 2 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

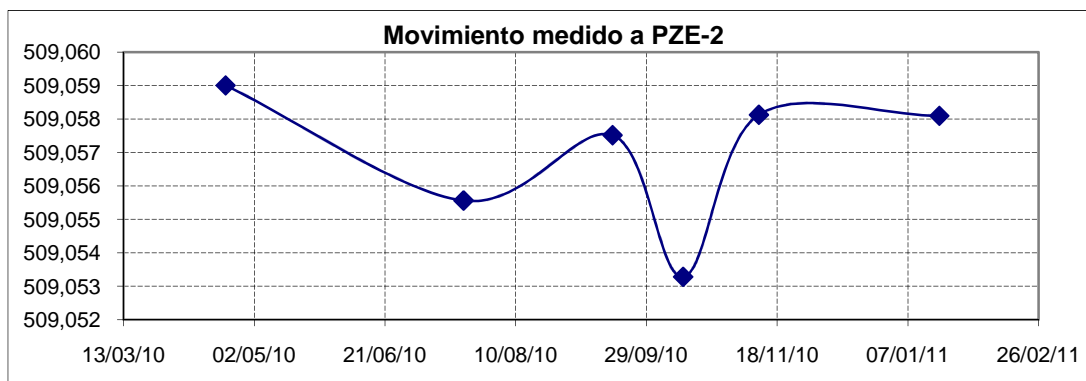


Figura 89. Promedio de la distancia medida = 509,057 m. Desviación estándar 2 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

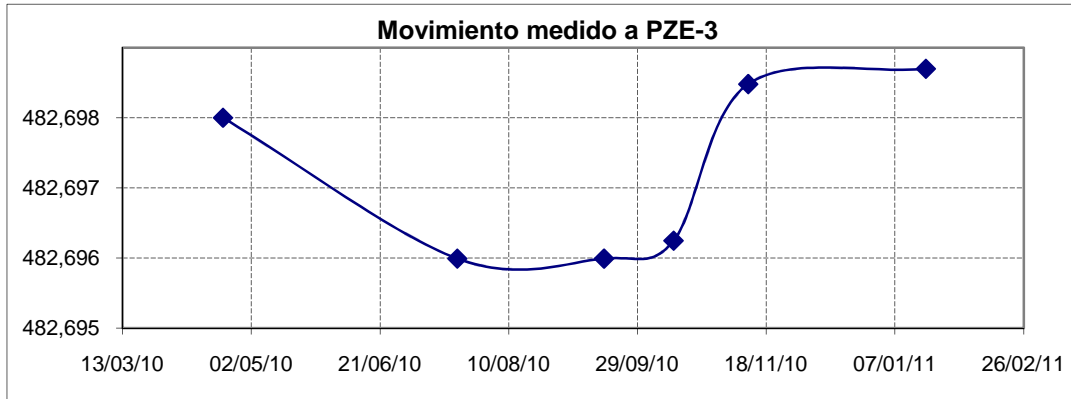


Figura 90. Promedio de la distancia medida = 482,697 m. Desviación estándar 1 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

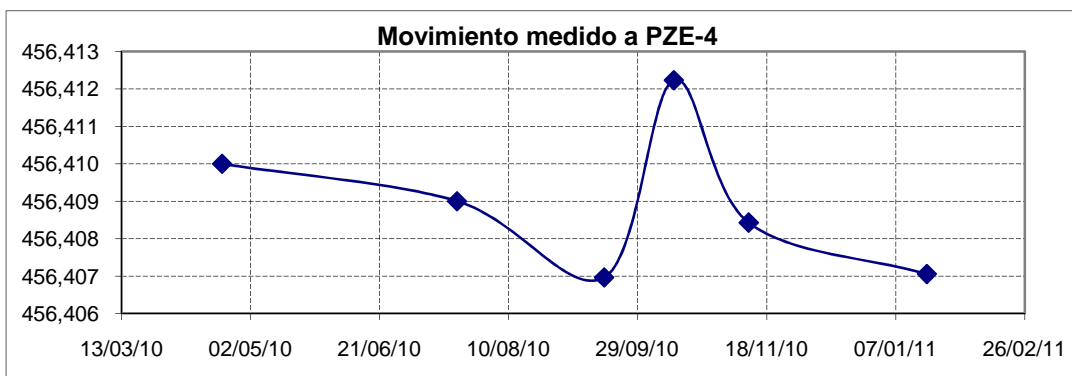


Figura 91. Promedio de la distancia medida = 456,409 m. Desviación estándar 2 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

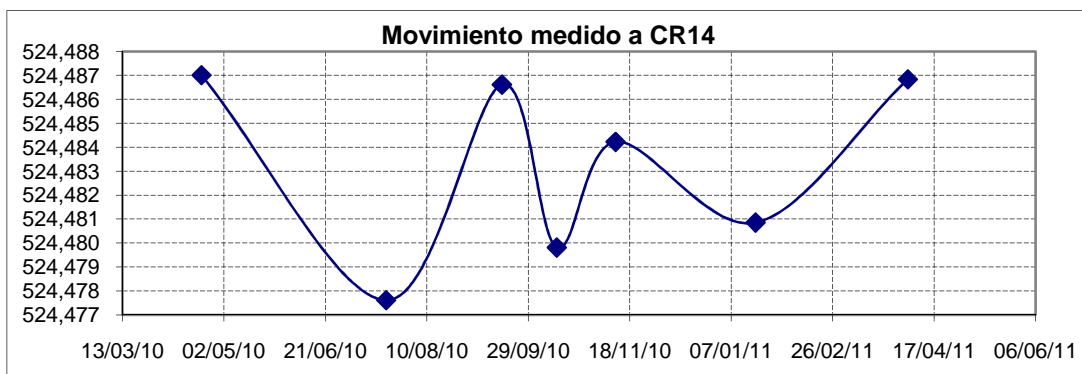


Figura 92. Promedio de la distancia medida = 524,483 m. Desviación estándar 4 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

Cabe destacar que se efectuaron dos campañas de medición topográfica a puntos fijos y móviles durante las mediciones GB-SAR en continuo, pero éstas fueron fallidas. Por otro lado, las campañas topográficas sirven también para verificar la estabilidad de la ubicación del GB-SAR: no existen movimientos de la ladera sobre la cuál se sitúa el instrumento ni movimientos locales alrededor de su ubicación. Para este último caso se han realizado también mediciones topográficas a una pequeña red de puntos de control situados alrededor del mismo.

Como se aprecia en las figuras anteriores el desplazamiento medido con topografía es muy pequeño, de hecho inferior a la propia precisión del distanciómetro de la estación total, que es de entorno a 1 o 2 cm para las distancias estudiadas (500 – 600 metros). Además la distancia muestra una apariencia aleatoria alrededor de la media, es decir, no hay un patrón de evolución de dichos datos. Por ello dichos puntos se consideran fijos o libres de movimiento.

A parte de realizar la selección de píxeles a estudiar en función de la coherencia de la fase se puede realizar estudiando la dispersión de la amplitud en el tiempo. De este modo se evalúa la estabilidad en la potencia de reflexión de los blancos en el tiempo, y no la estabilidad de fase.

A partir de este último criterio seleccionamos puntos estables que van más allá de la unidad inferior de la ladera y van hasta los 1600 metros de distancia desde el sensor (figura 93). A partir de los observables a dichos puntos podremos obtener un modelo de comportamiento, tal y como se detalla en el siguiente apartado.

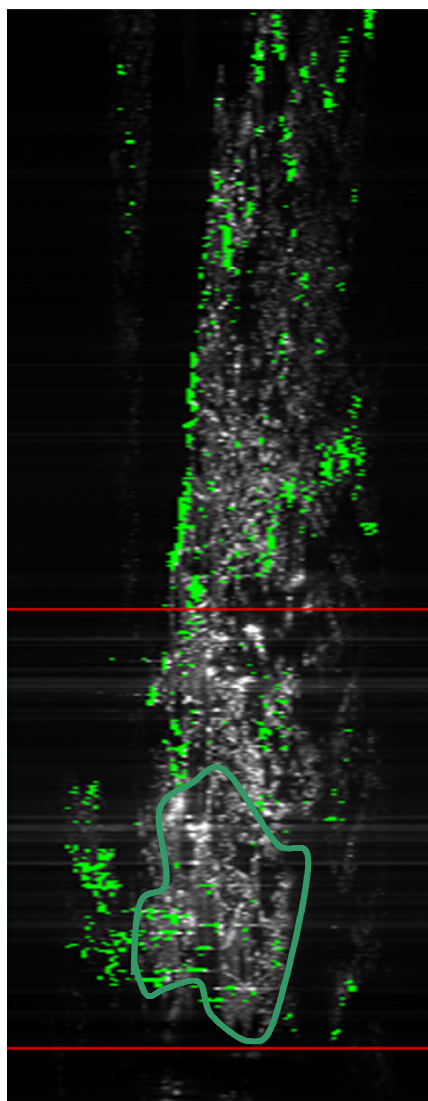


Figura 93. Imagen radar en la que se muestran (en verde) los puntos estables seleccionados en función de su estabilidad de amplitud. Todos los CR's que se encuentran en el interior de la línea verde son CR's que están en el área en movimiento de la unidad inferior de la ladera.

Fuente: Institut de Geomàtica.

5.1.2. Test del distanciómetro de la estación total.

Dado que la estación total, y especialmente su distanciómetro se emplea como verificación/comprobación de los datos medidos con GB-SAR y para verificar que los puntos estables realmente lo son, es importante verificar que dicha estación total realiza las correcciones oportunas por efecto de la temperatura y la presión de cara a obtener distancias libres de error. Según el fabricante, la estación total realiza una corrección sobre las distancias:

$$ppm = 275 - 79,55 \frac{p}{275 + t} \quad [65]$$

Donde,

ppm = partes por millón

p = presión atmosférica en mbar (o hPa)

t = temperatura en °C

Siendo la corrección nula en el caso de temperaturas igual a 20°C y presiones atmosféricas de 1013 hPa. Es por ello que se han medido una serie de distancias geométricas (o inclinadas) a un mismo blanco introduciendo en la estación total diferentes temperaturas y considerando una presión atmosférica constante y de valor 1013 mbar. Dicha prueba se realizó en el campus de la UPC de Castelldefels, en una visual en sombra en un día poco nublado y una temperatura real de unos 15-20°C. El resultado se muestra en la tabla 21.

	-10°C	0°C	20°C	45°	60°	70°
	117,897	117,899	117,902	117,903	117,905	117,906
	117,898	117,899	117,901	117,904	117,905	117,906
	117,897	117,900	117,901	117,903	117,905	117,906
	117,898	117,898	117,902	117,904	117,906	117,906
	117,897	117,900	117,902	117,903	117,906	117,907
	117,898	117,899	117,901	117,905	117,905	117,906
	117,898	117,899	117,900	117,903	117,905	117,906
	117,898	117,899	117,900	117,904	117,905	117,907
	117,897	117,900	117,901	117,902	117,905	117,905
	117,897	117,899	117,901	117,904	117,905	117,906
Dist. Prom.	117,8975	117,8992	117,9012	117,9035	117,9052	117,9061
Tª (°C)	-10°	0°	20°	45°	60°	70°
DESV. EST.	0,0005	0,0006	0,0008	0,0008	0,0004	0,0005

Tabla 21. Resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el distanciómetro de la estación total empleada para verificar los desplazamientos obtenidos con GB-SAR. Distancias en metros.

Fuente: Institut de Geomàtica.

En primer lugar se corrobora que la estación total **sí** realiza corrección por temperatura, dado que las distancias medidas son ligeramente diferentes al realizar la medida de las mismas. Por otro lado, si ajustamos una recta de regresión a los datos medidos tenemos obtenemos unos resultados que se muestra en la figura 94.

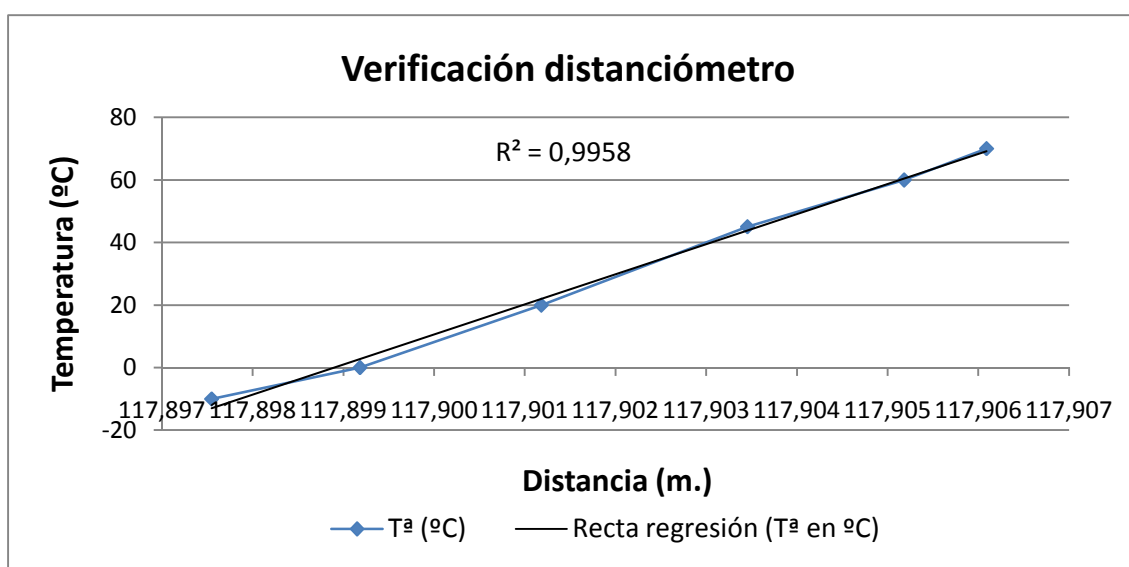


Figura 94. Distancia medida en función de la temperatura del aire. Fuente: Institut de Geomàtica.

La figura 94 corrobora que efectivamente la relación entre la corrección en distancia y la variación de temperatura es lineal. Por otro lado el ajuste mediante una recta de regresión es muy bueno dado que el factor de determinación R^2 se encuentra muy cercano a 1 y las desviaciones estándar son muy pequeñas en cada caso (0,5mm aproximadamente, ver tabla 21).

Para cada intervalo calculamos la variación que se produce en la medida de distancias por cada 1°C de variación de temperatura del aire, para una distancia promedio de unos 118 metros:

Variación en (mm/°C) para una distancia de 118 metros				
-10°C - 0°C	0°C - 20°C	20 - 45°	45° - 60°	60° - 70°
0,164	0,100	0,091	0,112	0,091

Promediando y considerando que el retardo es lineal en función de la distancia, tenemos que el error es de unos 5 mm cada 10°C de variación de temperatura a una distancia entre la estación total y el prisma reflector de 600 metros.

Se deduce que a lo largo de cada campaña topográfica es muy importante introducir correctamente la temperatura en la estación total, especialmente en horas de cambios bruscos de temperatura (orto/ocaso). Si la campaña de medición es de larga duración conviene apagar y encender la estación total antes de que se produzcan grandes variaciones de temperatura, introduciendo de nuevo la temperatura adecuada. Las mismas indicaciones deben seguirse de cara a las variaciones de presión atmosférica, aunque ésta afecta mucho menos que la temperatura sobre las señales que emite el distanciómetro.

5.1.3. Caracterización atmosférica mediante modelos lineales y cuadráticos.

Tal y como se ha explicado en el apartado anterior es necesario disponer de puntos fijos sobre la ladera de estudio, de tal forma que las medidas GB-SAR tomadas a dichos puntos arrojen resultados que se correspondan únicamente a la componente atmosférica (salvo residuales), dado que la componente topográfica es nula (desplazamientos nulos). De este modo podremos conocer cómo afecta la atmósfera a la fase medida en función de la distancia a la que se encuentre el blanco y para un instante de tiempo determinado.

Al procedimiento que es caso de estudio se le conoce como filtrado de datos atmosféricos (*Atmospheric data filtering*). El APS (*Atmospheric phase screen*) es crítico para poder medir desplazamientos con GB-SAR, especialmente cuando los puntos coherentes no están bien distribuidos en el área monitorizada. Debe haber puntos fijos estables a lo largo del escenario estudiado con el fin de estimar la componente de fase atmosférica. Este es un paso fundamental para obtener buenos resultados.

Para poder obtener imágenes Radar libres de artefactos atmosféricos hemos de aplicar un modelo atmosférico para cada imagen en particular, ajustando una función matemática (lineal o cuadrática) que modele el comportamiento atmosférico en función de la distancia: puntos más lejanos tienen mayor retardo de fase, es decir, mayor movimiento aparente.

Para corregir cada imagen es necesario:

- **Disponer de puntos fijos** en la ladera. En este caso vamos a emplear puntos situados fuera del área estudiada (más lejanos), correspondientes a la unidad intermedia y superior de la ladera de Vallcebre, además de unos pocos puntos situados en la unidad inferior sobre la barrera de calcáreas.
- Que los puntos fijos considerados tengan **buena coherencia espacial y temporal**, una **buena respuesta en amplitud** (buena potencia de reflexión), que estén **situados a diversas distancias** y estén **libres de enrollamiento de fase**.
- Para cada imagen, disponer de **la fase medida a los puntos estables** y de **la fase medida a los puntos no estables** de los cuales buscamos hallar la componente topográfica.

Por lo tanto corregimos cada imagen a partir de la propia fase medida a puntos estables del propio interferograma.

Tal y como se ha demostrado en apartados anteriores, puntos más lejanos presentan mayor retardo atmosférico. Puede proporcionarse dicho retardo a la distancia mediante una razón lineal o cuadrática.

En las figuras 95 y 96 se muestran varios ejemplos de lo expuesto, con mediciones SAR tomadas sobre la ladera de Vallcebre el día 11 de noviembre de 2010. En ambas se muestran varios ejemplos de gráficas **APS versus Distancia** para diferentes imágenes (12:22h, 16:03h; 20:42h, etc.), donde cada gráfica representa una imagen. Cada punto de cada gráfica se corresponde con el retardo APS (*APS delay*) para un píxel en la imagen a una distancia [X] hasta el sensor, suponiendo que dichos puntos son estables.

a) Caracterización atmosférica mediante un modelo lineal

En este caso caracterizamos el comportamiento atmosférico mediante un modelo lineal. En la figura 95 se muestran dos líneas de regresión correspondientes a dos imágenes (16:03 h y 20:42 h). R^2 es el coeficiente de determinación (o de correlación de Pearson) de cada una de dichas líneas de regresión, valor comprendido entre 0 y 1 y que se emplea como medida del grado de fiabilidad o bondad del ajuste del modelo.

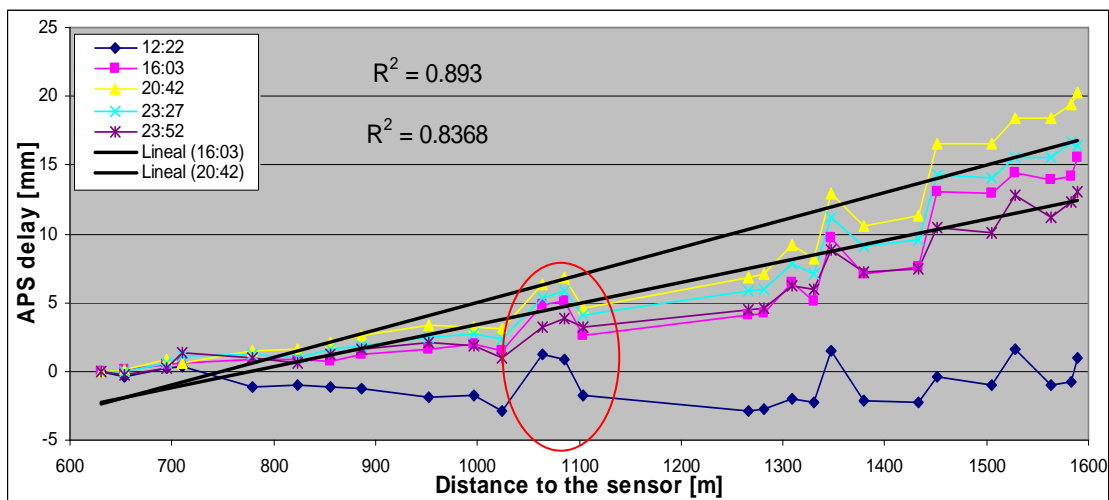


Figura 95. Ajuste de resultados APS versus distancia mediante un modelo lineal. Fuente: Institut de Geomàtica.

b) Caracterización atmosférica mediante un modelo cuadrático

En este caso caracterizamos el comportamiento atmosférico mediante un modelo cuadrático (parábola). En la figura 96 se muestran dos polinomios cuadráticos de regresión correspondientes a dos imágenes (16:03 h y 20:42 h). En este caso R^2 es superior que en el caso lineal, por lo que se observa a primera instancia que este modelo se adapta mejor de cara a caracterizar los efectos APS en función de la distancia.

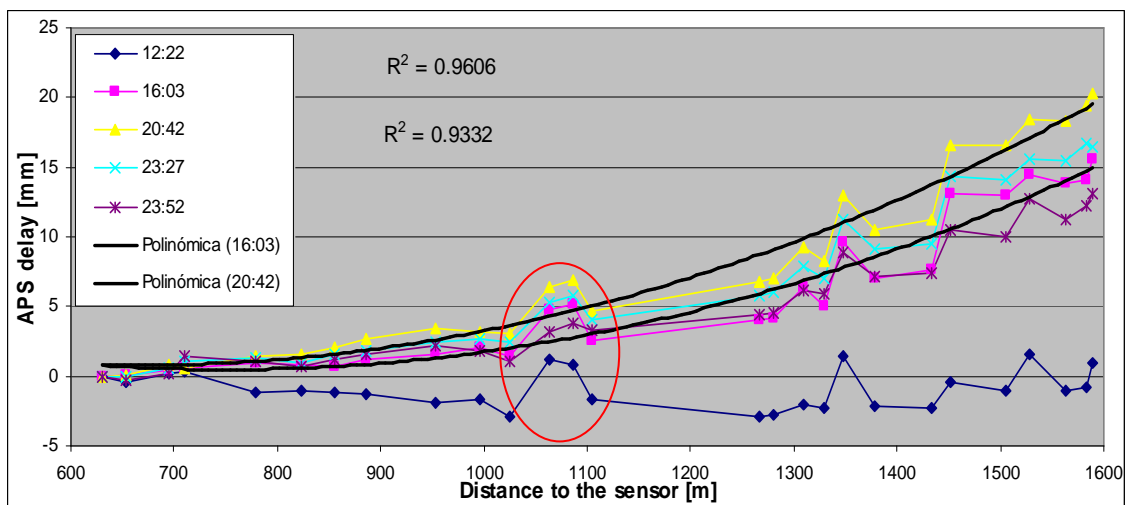


Figura 96. Ajuste de resultados APS versus distancia mediante un modelo cuadrático. Fuente: Institut de Geomàtica.

Por otro lado se puede observar que la imagen representada en azul (12:22 h), está desplazada respecto de las otras. Esto puede deberse a un error de *aliasing* (enrollamiento de fase). También se puede observar unos artefactos atmosféricos extraños a unos 1000 – 1100 metros de distancia desde el sensor (círculo rojo de las figuras 95 y 96). Esto puede deberse a la existencia de algún elemento a esta distancia que produzca humedades mayores repentinas, como la existencia de algún canal o elemento similar.

5.1.4. Conclusiones.

Como se ha visto el modelo cuadrático se ajusta mucho mejor que el modelo lineal, algo que puede apreciarse visualmente en las figuras 95 y 96 y observando los coeficientes de correlación R^2 , que aumentan sustancialmente en el caso del ajuste mediante dicho modelo. Por ello el modelo cuadrático será el que empleemos para caracterizar la atmósfera en las mediciones GB-SAR efectuadas en continuo a lo largo de 19 días en noviembre y diciembre de 2010, es decir, el modelo que emplearemos para corregir cada una de las imágenes y poder obtener finalmente el desplazamiento producido a lo largo de los 19 días.

Por otro lado hay que tener en cuenta que caracterizamos la atmósfera a partir de datos de puntos estables situados en las unidades intermedia y superior de la ladera de Vallcebre, y por lo tanto en las correcciones a puntos no estables de la unidad inferior realizamos una extrapolación, motivo por el cuál puede quedar cierto residuo atmosférico.

Finalmente, y dada la geometría de la ladera, puede verse que la topografía de la misma influye fuertemente sobre las propiedades de la atmósfera que atraviesan las señales (especialmente humedad y temperatura), de modo que el retardo atmosférico no es solo función de la distancia que recorren las señales sino también función de la topografía de la ladera de estudio.

5.2. RESULTADOS OBTENIDOS. PUNTOS ESTABLES.

A partir de los modelos expuestos podemos llegar a una imagen SAR corregida en la que la fase se corresponda únicamente a la componente de la distancia (función de la topografía del terreno). Diferenciando entre dos imágenes SAR corregidas por dicho efecto atmosférico hallaremos $\Delta\phi_{dist} = 2 \cdot \phi_{mov}$ y finalmente el valor del desplazamiento. En las figuras 97, 98, 99 y 100 se muestran los desplazamientos residuales que se obtienen a partir de las imágenes corregidas de efectos atmosféricos tras aplicar el modelo cuadrático sobre dichos puntos fijos (ver figuras 67 a 70 para ubicar estos puntos en la ladera).

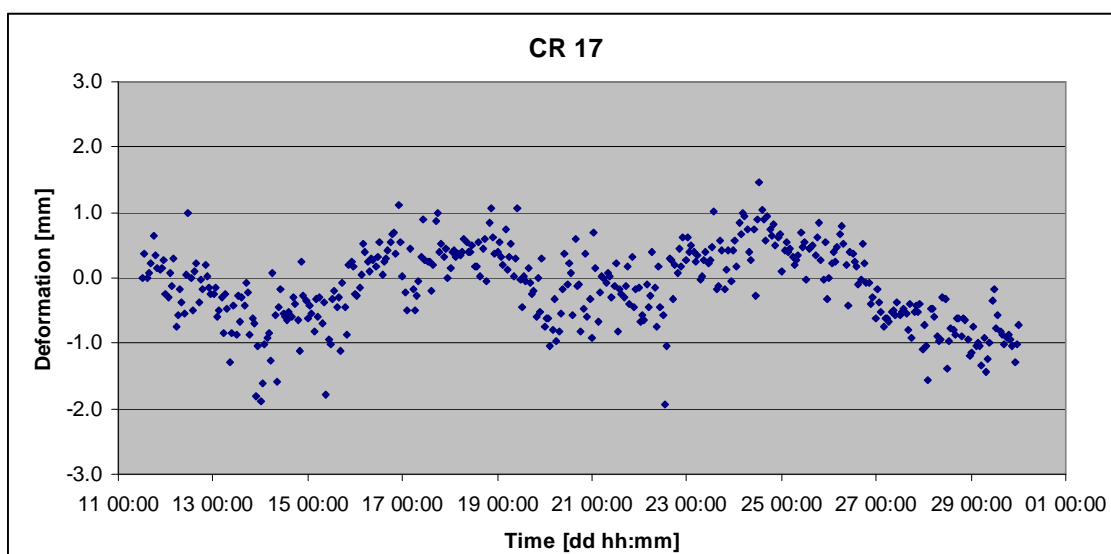


Figura 97. Desplazamientos del CR17 (estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 0,6 mm, Distancia 738 m. Fuente: Institut de Geomàtica.

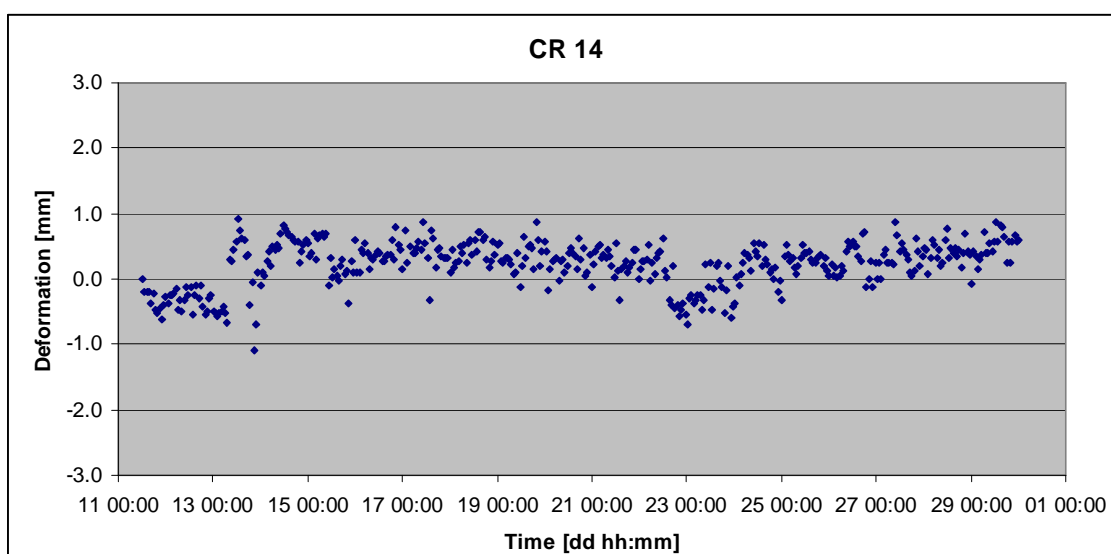


Figura 98. Desplazamientos del CR14 (estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 0,3 mm, Distancia 653 m. Fuente: Institut de Geomàtica.

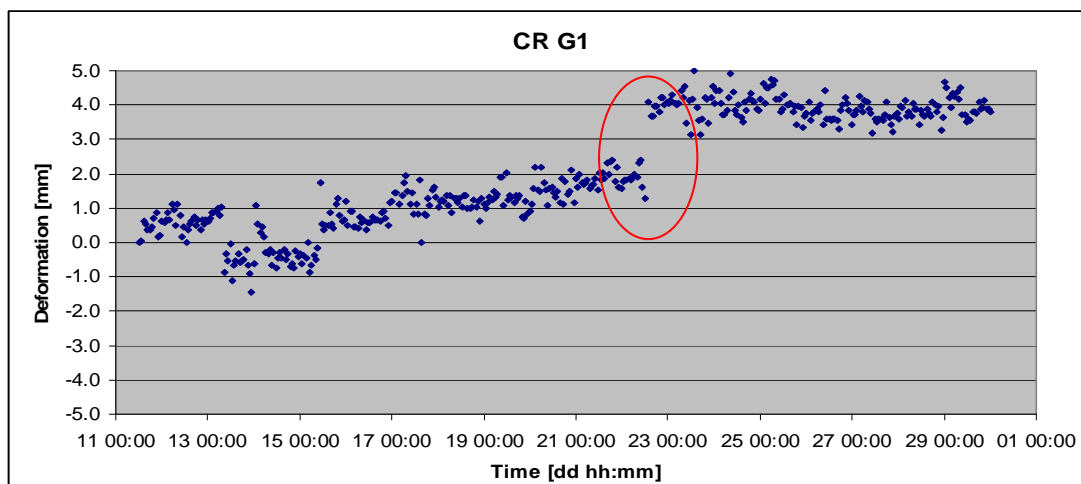


Figura 99. Desplazamientos del CRG1 (estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 0,8 mm, Distancia 886 m. Existe una anomalía (círculo rojo) en el que se produce un salto repentino, probablemente a causa de movimiento del CR dado que estaba colocado en el suelo sin fijar. Fuente: Institut de Geomàtica.

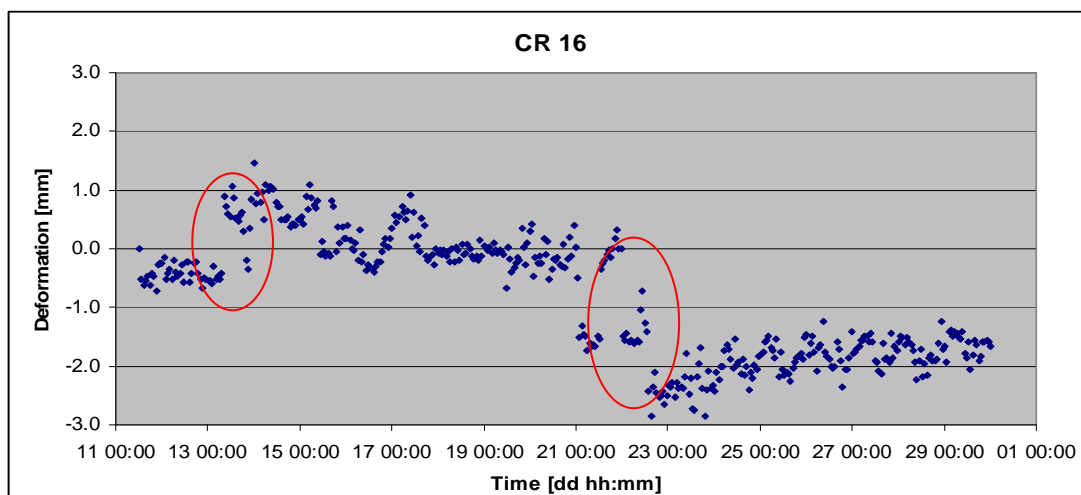


Figura 100. Desplazamientos del CR16 (estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 1,0 mm, Distancia 631m. Existen dos anomalías (círculos rojos) en las que se producen dos saltos que son atmosféricos. Fuente: Institut de Geomàtica.

Como se aprecia, aún corrigiendo los puntos estables tenemos anomalías que en ocasiones pueden resultar importantes y que es necesario filtrar. Además existen residuales, dado que el modelo se genera con medidas de fase tomadas a puntos externos a la zona de estudio (unidades intermedia y superior de la ladera), y se lleva a cabo una extrapolación para corregir de atmósfera los puntos de las imágenes relativos a la unidad inferior de la ladera.

Finalmente, la precisión mencionada en las figuras anteriores se refiere a la desviación estándar, que puede ser relacionada directamente con la precisión propia del aparato de medida y que se encuentra en todo caso por debajo de **1 mm de precisión**. Se sabe que dichos CR's son fijos a partir de las medidas de topografía tomadas (ver apartado anterior), y además con los resultados GB-SAR expuestos también podemos concluir que lo son.

5.3. RESULTADOS OBTENIDOS. ZONA NO ESTABLE.

En este caso procedemos como en el apartado anterior, en el que se aplica el modelo cuadrático a todas las imágenes a lo largo del tiempo, pero en este caso para diversos CR's que se encuentran en movimiento. Los desplazamientos finales que se extraen de las imágenes ya corregidas de efectos atmosféricos a partir del modelo cuadrático se muestran en las figuras 101, 102, 103, 104, 105 y 106 (ver figuras 67 a 70 para ubicar estos puntos en la ladera).

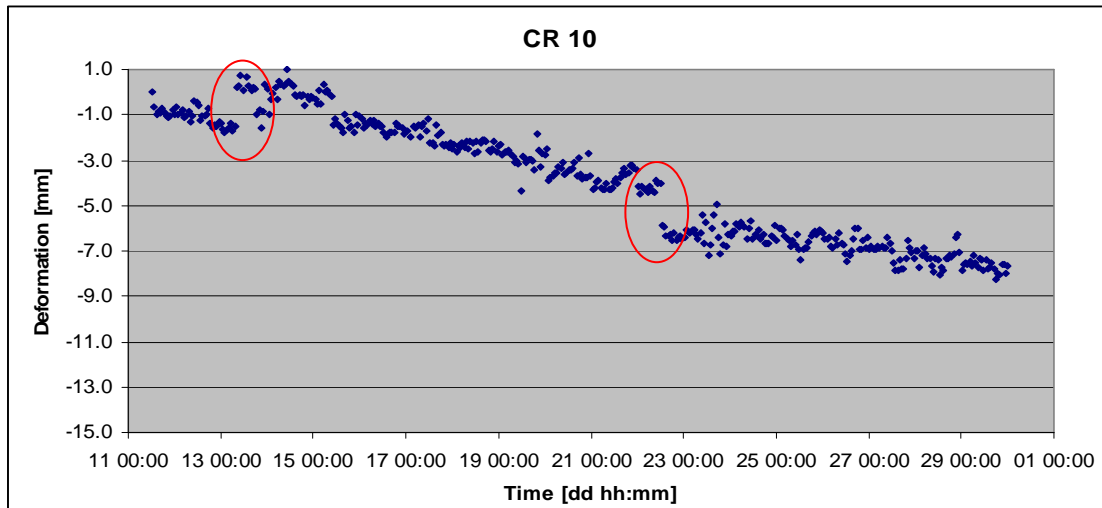


Figura 101. Desplazamientos del CR10 (no estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 0,8 mm, Distancia 589 m. Existen dos anomalías (círculos rojos) en las que se producen dos saltos que son atmosféricos (al igual que el CR16, son CR's muy próximos). El desplazamiento total estimado a lo largo de la observación es de unos 8 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

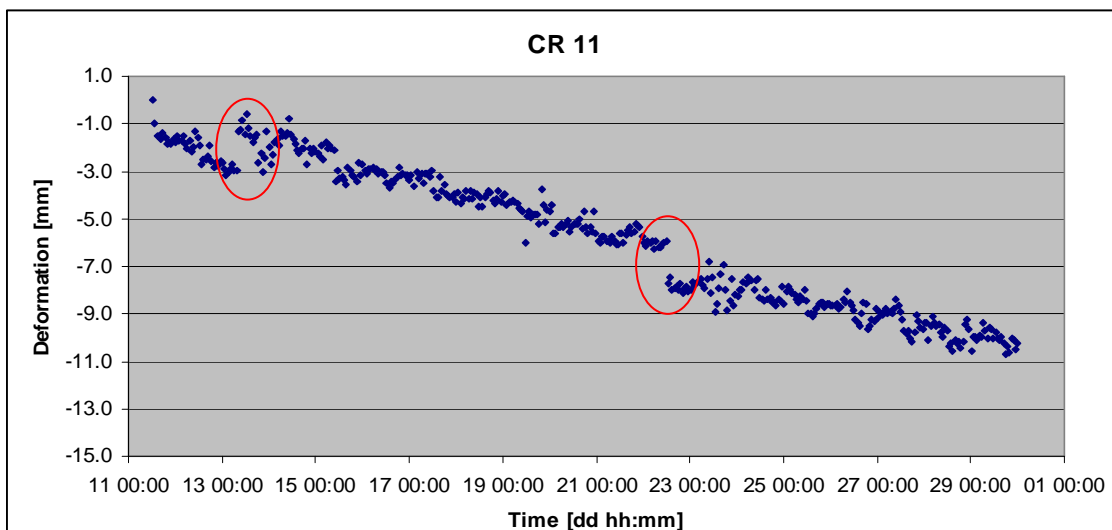


Figura 102. Desplazamientos del CR11 (no estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 0,7 mm, Distancia 598 m. Existen dos anomalías (círculos rojos) en las que se producen dos saltos que son atmosféricos (al igual que el CR16, son CR's muy próximos). El desplazamiento total estimado a lo largo de la observación es de unos 11 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

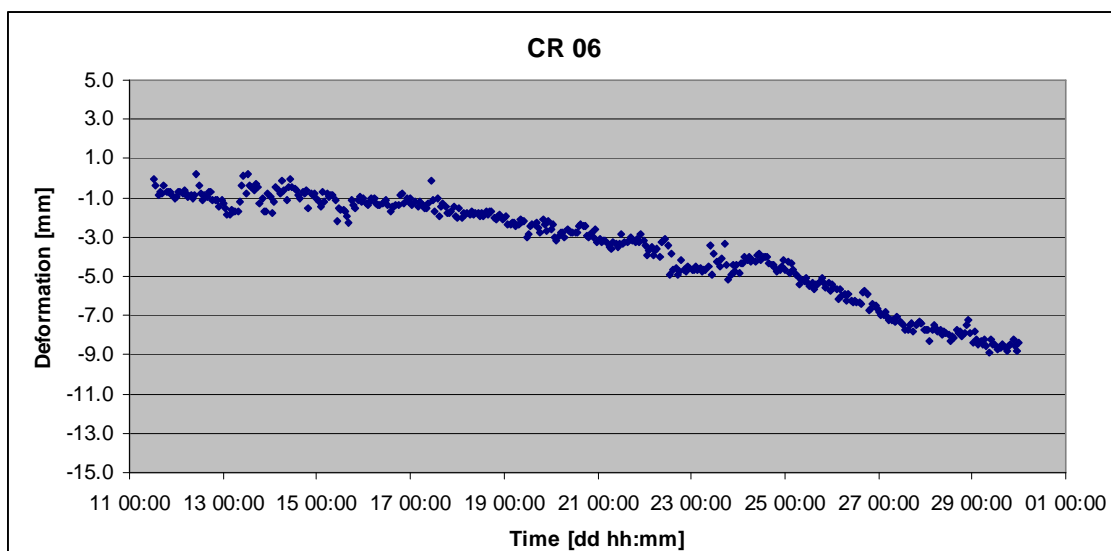


Figura 103. Desplazamientos del CR06 (no estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 0,8 mm, Distancia 640 m. El desplazamiento total estimado a lo largo de la observación es de unos 9 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

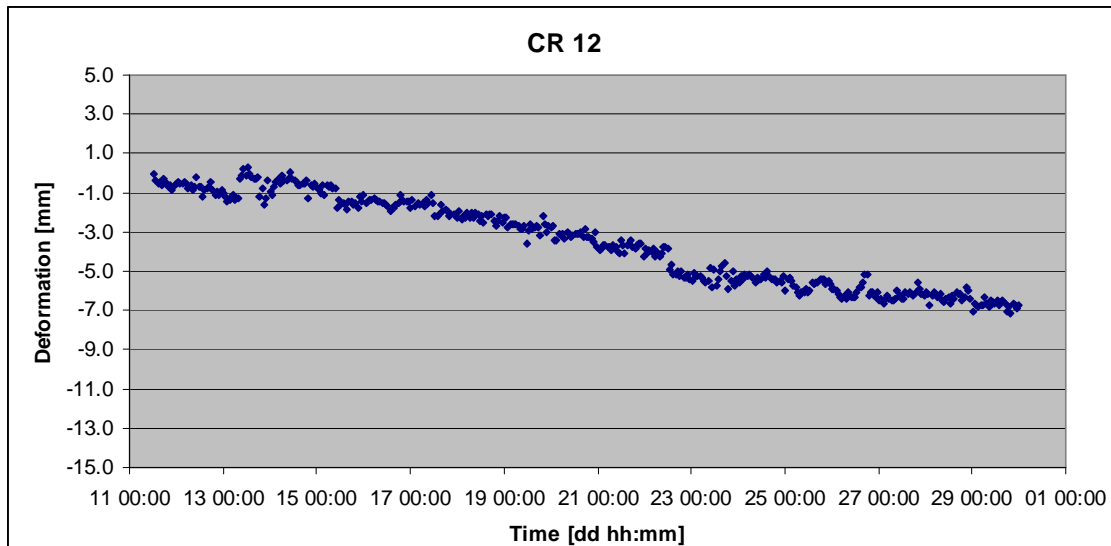


Figura 104. Desplazamientos del CR12 (no estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 0,5 mm, Distancia 634 m. El desplazamiento total estimado a lo largo de la observación es de unos 7 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

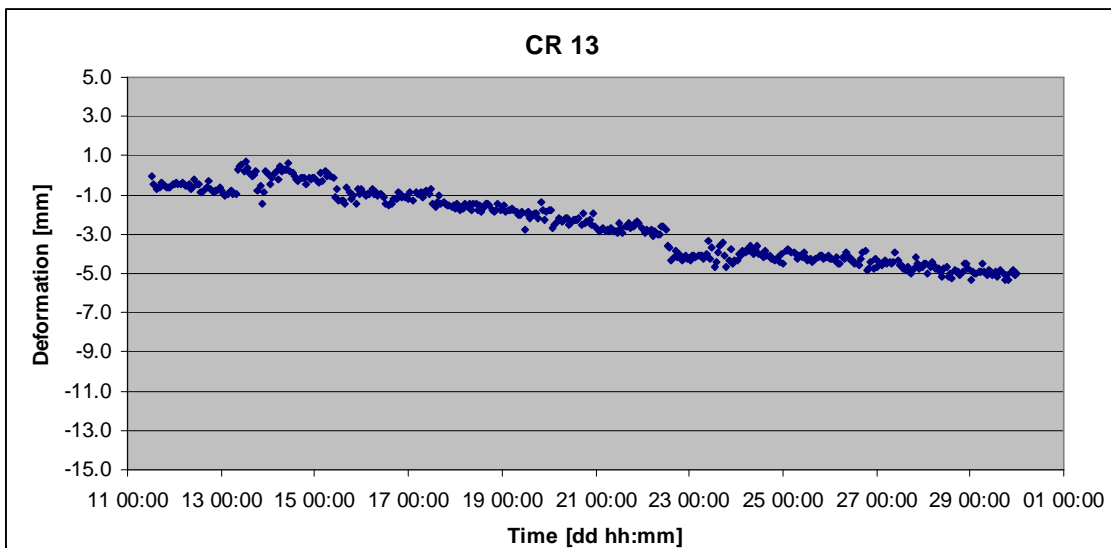


Figura 105. Desplazamientos del CR12 (no estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 0,5 mm, Distancia 627 m. El desplazamiento total estimado a lo largo de la observación es de unos 5 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

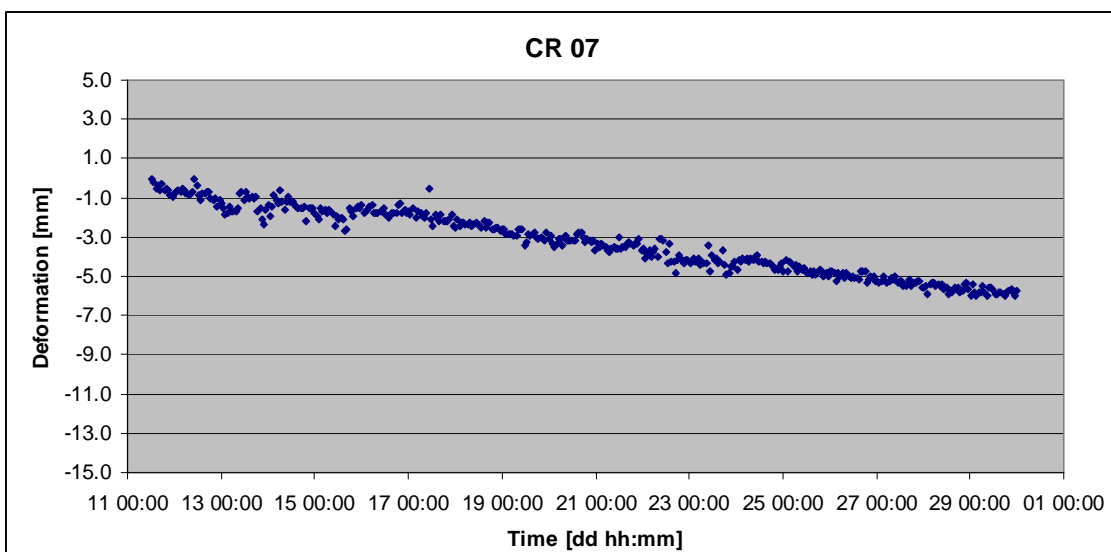


Figura 106. Desplazamientos del CR12 (no estable) a lo largo de la observación GB-SAR en continuo. Precisión 0,4 mm, Distancia 677 m. El desplazamiento total estimado a lo largo de la observación es de unos 5 mm. Fuente: Institut de Geomàtica.

Los puntos estudiados tienen desplazamientos totales que son similares a lo largo de todo el período de observación, y que se encuentran entre los 5 y 11 mm. Cabe destacar que la dispersión de los datos es pequeña a lo largo del tiempo, cosa que implica una desviación estándar baja y por lo tanto una buena precisión, que se encuentra entre los 0,4 y los 0,8 mm.

Es importante recordar que los desplazamientos están medidos en la LOS (*Line of Sight*), es decir, en la dirección sensor-blanco para cada punto o CR. El desplazamiento absoluto de los puntos estudiados será mayor que los medidos con GB-SAR.

Se observa que por desgracia los desplazamientos son muy pequeños a lo largo del periodo de observación en continuo, algo inusual dado que el promedio mensual de desplazamiento en la unidad inferior de la ladera es de unos 2 o 3 cm, pero la ausencia de lluvias a lo largo de las observaciones han propiciado una deceleración del desplazamiento de la misma.

Los desplazamientos han sido tan pequeños que están por debajo de la precisión del distanciómetro de la estación total (alrededor de 1cm a las distancias medidas), por lo que no es significativo verificar que los desplazamientos medidos con GB-SAR se corresponden con los de las campañas topográficas. Además, las campañas topográficas realizadas en dicho período de observación en continuo han resultado fallidas.

5.4. CONCLUSIONES.

Para poder eliminar la componente atmosférica de las imágenes y de este modo obtener los desplazamientos hay que tener en cuenta varios factores. A continuación se muestran una serie de conclusiones y de factores a tener en cuenta en este caso.

- Es necesario situar puntos estables sobre la ladera de estudio, verificando mediante topografía que dichos puntos son realmente estables.
- Los puntos estables deben aparecer en cada interferograma como pixeles de alta coherencia y de buena potencia de reflexión.
- Toda la fase observada a dichos puntos estables se corresponde a artefactos atmosféricos, dado que no existe desplazamiento. Obviamos el ruido.
- Podemos ajustar modelos lineales o cuadráticos. Dichos modelos cuantifican el efecto de la atmósfera sobre la fase en función de la distancia blanco-sensor para un instante de tiempo determinado. *APS versus Distancia*.
- Para aplicar el modelo de corrección *APS versus distancia*, sea lineal o cuadrático, es necesario que los puntos empleados para caracterizar la atmósfera se encuentren bien distribuidos a lo largo de la imagen, es decir, que se encuentren a diferentes distancias.
- Los puntos fijos que se emplean para modelar el comportamiento atmosférico se encuentran fuera del área de estudio, a distancias superiores, concretamente en las unidades intermedia y superior de la ladera. Por ello al aplicar el modelo sobre los interferogramas para corregir de atmósfera el resto de puntos, quedarán residuales ya que se está llevando a cabo una extrapolación.
- En este caso en particular se ha podido observar que el modelo cuadrático se ajusta mucho mejor que el modelo lineal, de modo que es el modelo que se aplica para corregir las imágenes. Además se puede deducir una cierta influencia de la topografía de la ladera sobre el comportamiento de la atmósfera en estas capas bajas de la misma.
- Al corregir los puntos estables de atmósfera a partir del modelo, el resultado es aceptable y el nivel de precisión es submilimétrico. Dicha precisión se deduce

calculando la desviación estándar de los resultados (desplazamientos a lo largo del tiempo). Figuras 97 a la 100.

- Al corregir los puntos no estables de atmósfera a partir del modelo cuadrático el resultado es satisfactorio, ya que en todos los casos se observa una tendencia clara de deslizamiento de la ladera en un sentido concreto (hacia el torrente de Vallcebre, y no de otro modo) y asimismo con precisión submilimétrica. Figuras 101 a la 106.
- Los desplazamientos obtenidos para las observaciones en continuo (19 días en noviembre y diciembre de 2010) son de entre 5 y 11mm en la LOS (*Line of Sight*). Dichos desplazamientos están por debajo de la media, dado que el período de observación se corresponde con un período seco (sin lluvias), por lo que es un periodo de deceleraciones en el movimiento de la ladera.
- Los desplazamientos medidos son en la LOS (*Line of Sight*), es decir, en la línea que une el blanco con el sensor. El desplazamiento total de dichos puntos estudiados (CR's) será mayor que los medidos con GB-SAR.
- Los desplazamientos medidos son muy pequeños y se encuentran por debajo de la precisión de medida de la estación total, por lo que no es posible realizar una validación topográfica de resultados. Además, se realizaron dos campañas de medidas topográficas durante la observación en continuo pero fueron fallidas.
- El único modo que tenemos de verificar la bondad de los resultados obtenidos, y más concretamente de asegurar que el modelo atmosférico funciona, es a partir de los resultados obtenidos tras aplicar el modelo: verificar que los puntos estables realmente lo son y que los puntos no estables siguen una evolución lógica y coherente, calculando en ambos casos la desviación tipo de los resultados (desplazamientos a lo largo del tiempo), que nos lleva a precisiones submilimétricas en ambos casos. La desviación tipo nos da la precisión de la medida efectuada en cada caso.
- No se han aceptado variaciones de fase entre imágenes consecutivas (7 minutos) superiores 3.2 mm en LOS. Se trata de un umbral fijado para evitar enrollamiento de fase.

IV. CONCLUSIONES FINALES.

Las conclusiones finales resumen las establecidas en los anteriores capítulos. Se han agrupado en apartados para su mejor apreciación:

- i) Conclusiones sobre la monitorización de laderas inestables*
- ii) Conclusiones sobre la monitorización de laderas inestables con GB-SAR*
- iii) Conclusiones sobre las observaciones GB-SAR en continuo: aplicación de un modelo atmosférico a partir de datos meteorológicos medidos en campo.*
- iv) Conclusiones sobre las observaciones GB-SAR en continuo: caracterización de la atmósfera ajustando funciones lineales y cuadráticas. Obtención de desplazamientos.*
- v) Conclusiones sobre la monitorización de laderas inestables con GPS Diferencial*
- vi) Conclusiones sobre la monitorización de laderas mediante Topografía clásica*

i) Conclusiones sobre la monitorización de laderas inestables

Es bastante habitual que las técnicas de medida de deformaciones funcionen mediante campañas de medición puntuales, a partir de las cuales obtenemos el diferencial de desplazamiento entre dos épocas sucesivas (semanas, meses o años). En este caso consideramos que la velocidad a la que se han producido dichos desplazamientos es constante en el tiempo entre ambas campañas de medición. Existen métodos de monitorización que permiten la lectura continua de datos, de modo que podemos conocer la evolución continua de las deformaciones en el tiempo y detectar comportamientos de aceleración o deceleración de movimientos que suceden de forma puntual y van previsiblemente asociados a algún factor externo, como por ejemplo el efecto de la lluvia. El seguimiento de dichos movimientos nos servirá para establecer las causas del fenómeno base.

A continuación se describen algunas consideraciones a tener en cuenta en la monitorización de laderas [61 y presente trabajo]:

- Los puntos seleccionados deben reflejar en la medida de lo posible el comportamiento del área en el que se encuentran. Por lo tanto hay que descartar la elección de puntos que puedan tener movimientos propios, aunque en ocasiones es inevitable.
- Es conveniente usar más de una técnica para poder complementar y contrastar los resultados obtenidos, es decir, verificar la calidad de los mismos. No es una buena idea emplear un solo método de medida.
- Técnicas que nos permitan una lectura en continuo serán preferibles por delante de aquellas que precisen de campañas puntuales para la adquisición de datos, aunque tiene ciertos inconvenientes, fundamentalmente un posible elevado coste de instalación.

- Es fundamental la elección adecuada de la instrumentación a emplear en cada caso. Será función de las características de la ladera de estudio, por ejemplo de la magnitud de sus movimientos o de la precisión requerida en la medida de los mismos.
- Los condicionantes de emplazamiento, de tiempo, técnicos y económicos son los que van a dictar cuál o cuáles se van a emplear.
- Es conveniente incluir en la red de control una serie de puntos fijos que se encuentren fuera de la ladera de estudio. El movimiento aparente de los puntos que se encuentran en la franja estable nos ofrece directamente la calidad o grado de fiabilidad de los desplazamientos medidos. También conviene la repetición de observaciones realizadas y cierta redundancia de datos.
- Únicamente sistemas automáticos, de registro continuo y con transmisión remota de los resultados pueden constituir la base para sistemas de alerta temprana (*Early Warning*) que sirvan de ayuda para gestionar situaciones de especial riesgo.

En laderas como la de Vallcebre, la magnitud del movimiento es fuertemente dependiente de los períodos lluviosos, por lo que es recomendable tener un registro continuo de la pluviometría de la zona para cruzarla con los datos piezométricos y de desplazamientos medidos (mejor en continuo). Es muy probable que nos encontremos que en períodos de lluvia exista una aceleración en los desplazamientos medidos, producida por un aumento de presión intersticial en el subsuelo que hace disminuir la tensión efectiva del terreno en profundidad.

La precipitación caída en forma de nieve debe incorporarse al análisis temporal en el momento de su fusión. La ladera de Vallcebre ha experimentado movimientos moderados durante el período cubierto en este TFC dada la escasez de lluvias en el período observado.

ii) Conclusiones sobre la monitorización de laderas inestables con GB-SAR

- La técnica GB-SAR requiere la obtención de imágenes que contengan píxeles de elevada coherencia bien distribuidos en la misma. Esto es más frecuente en zonas urbanas que en zonas montañosas y/o rurales vegetadas.
- Las laderas son por definición zonas muy vegetadas, por lo que será difícil encontrar blancos que ofrezcan una fase interferométrica estable (reflectores naturales), y por lo tanto es necesaria la instalación de reflectores artificiales o *corner reflectors*.
- A la hora de evaluar la viabilidad técnica del GB-SAR en una ladera hay que considerar la dificultad de instalación y mantenimiento de los *corner reflectors*, con el coste que ello supone.
- La instalación, transporte y orientación de *corner reflectors* es costosa pero también necesaria antes de efectuar cada medida SAR. Se trata de uno de los principales condicionantes a tener en cuenta a la hora de emplear técnicas GB-SAR.
- Existe el riesgo de *aliasing* asociado a desplazamientos rápidos del terreno en relación al intervalo de adquisición de las imágenes. La técnica requiere pequeños movimientos: no es posible medir desplazamientos mayores a la mitad de la longitud de onda, en este caso 9 mm.

- La atmósfera afecta fuertemente sobre las señales. En caso de no conseguir ‘anular’ la componente atmosférica de la fase medida no será posible obtener desplazamientos.
- Para hallar desplazamientos es necesario obtener dos imágenes Radar tomadas en instantes de tiempo diferentes, corregirlas de atmósfera y diferenciar la fase entre ellas.
- Hay que tener especial cuidado en la interpretación y análisis de los datos, dado que las deformaciones se obtienen en dirección de la LOS (*Line of Sight*), es decir, en la dirección entre el sensor y el blanco o punto estudiado en cada caso. El desplazamiento real será por lo tanto mayor al medido con GB-SAR.
- Es necesario realizar una validación o verificación de resultados obtenidos mediante técnicas clásicas.

Existen dos modalidades posibles de observación GB-SAR (ambas cubiertas por las campañas del *Institut de Geomàtica* en Vallcebe y por este TFC):

- a) Campañas puntuales:** capturamos diversas imágenes SAR durante un período corto de tiempo (por ejemplo una hora) y no volvemos a tomar más medidas hasta que el terreno se haya desplazado lo suficiente, por ejemplo dos meses más tarde. De este modo obtenemos imágenes SAR en dos momentos separados en el tiempo y diferenciando entre dichas imágenes hallaremos el desplazamiento en la LOS que se ha producido en el lapso de tiempo comprendido entre ambas campañas. Es importante asegurarse de que el equipo GB-SAR realiza las observaciones desde una zona estable y reposicionar el instrumento de forma adecuada en cada campaña.
- b) Campañas en continuo:** capturamos imágenes SAR ininterrumpidamente a lo largo de un largo período de tiempo, por ejemplo una semana, obteniendo cientos o incluso miles de imágenes SAR del mismo escenario. Podemos obtener desplazamientos diferenciando entre imágenes del inicio y del final de la campaña. Además, podemos obtener aceleraciones y deceleraciones de dichos movimientos: permite la monitorización de desplazamientos en continuo. Por otro lado, con esta modalidad podemos obtener datos del comportamiento atmosférico a lo largo del tiempo, analizando las variaciones de fase que se producen en cortos períodos de tiempo, por ejemplo a lo largo de la puesta de sol, variaciones de respuesta diurna-nocturna, o por ejemplo en determinados momentos singulares (lluvia, fuerte viento o nieve).

iii) Conclusiones sobre las observaciones GB-SAR en continuo: aplicación de un modelo atmosférico a partir de datos meteorológicos medidos en campo.

Durante la campaña de medición en continuo se han dispuesto tres sensores de temperatura y humedad relativa que registran dichos datos cada 5 minutos, junto a *corner reflectors*, con el objetivo de poder llegar a modelar la atmósfera con precisión y corregir la fase de las imágenes Radar de cara a obtener imágenes ‘libres de atmósfera’, imágenes donde toda la fase se corresponda con la componente topográfica. De este modo obtendremos desplazamientos diferenciando la fase entre imágenes corregidas.

- Como se observa en los datos meteorológicos brutos para cada CR (figuras 77, 78 y 79), al aumentar la humedad disminuye la temperatura y viceversa. Además la tendencia de la humedad y la temperatura a lo largo del tiempo es similar en los tres CR's (figuras 75 y 76). Estas dos cuestiones nos llevan a la conclusión de que no existen errores groseros en la medida por parte de los tres sensores de temperatura y humedad relativa empleados, al registrar comportamientos similares de humedad y temperatura para cada CR a lo largo del tiempo. Es una primera validación de que las mediciones de los sensores son correctas y que ninguno de ellos registra anomalías. Además se puede apreciar claramente la periodicidad del tren de datos (12/24 horas).
- En cuanto a los desplazamientos medidos con GB-SAR se observa que la serie de datos para cada CR sigue una tendencia similar (figuras 73 y 74). Ello es, como en el caso anterior, una primera validación de que las mediciones realizadas con GB-SAR son coherentes entre sí, dado que se registra un comportamiento similar en todos los casos: ha de ser así dado que todos los CR's son blancos estables muy cercanos, y por lo tanto el comportamiento ha de ser similar para todos. También se observa que en general los desplazamientos aparentes medidos con GB-SAR son mayores cuanto mayor es la distancia que atraviesan las ondas radar a través de la atmósfera desde el sensor hasta el blanco (figura 84): mayor retardo atmosférico a mayor distancia del sensor GB-SAR al CR. Es decir, el desplazamiento aparente debido a artefactos atmosféricos es directamente proporcional a la distancia que separa el sensor del blanco.
- Como se observa en las gráficas que superponen los modelos atmosféricos y las mediciones del GB-SAR (figuras 81, 82 y 83), el comportamiento medido con GB-SAR tiene una fuerte correlación con los resultados del modelo atmosférico. Se puede asegurar que el comportamiento de la fase medida se corresponde con los artefactos atmosféricos (al propagarse las señales por la troposfera), y no con otros fenómenos. Asimismo podemos asegurar que el modelo atmosférico aplicado funciona correctamente y no presenta anomalías.
- La diferencia entre el desplazamiento obtenido con GB-SAR y el modelo (el residuo), es siempre inferior a 9 mm, es decir, inferior a 2π en términos de fase, motivo por el cuál deducimos que no existe enrollamiento de fase de los datos GB-SAR que estamos empleando: el software IBIS-L ha desenrollado la fase correctamente, algo que no siempre es así. El residuo debe ser inferior a 2π para que la comparativa tenga sentido.
- Existe una fuerte correlación entre el desplazamiento medido con GB-SAR y el obtenido aplicando el modelo atmosférico (figuras 81, 82 y 83). No obstante, aunque la correlación es fuerte en cuanto a la tendencia del tren de datos a lo largo del tiempo, no lo es en cuanto a la magnitud de los resultados: el modelo sobreestima en términos generales el retardo atmosférico. Ello es debido a que la humedad está sobreestimada en todos los casos, ya que el sensor empleado para su medición se encuentra a ras de suelo, registrándose humedades mayores a las medidas a lo largo de LOS (*Line Of Sight*).
- Al aplicar el modelo atmosférico se aprecia que la humedad influye más que la temperatura en el retardo de las ondas a través de la atmósfera.

- Es difícil caracterizar con precisión el comportamiento atmosférico empleando un solo sensor junto al blanco (CR) y considerar la refractividad N constante a lo largo de toda la masa de aire que atraviesan las señales Radar; tenemos un solo valor de refractividad N que no es suficientemente representativo para caracterizar la atmósfera con precisión. Además colocar dichos sensores a ras de suelo nos lleva a una sobreestimación de la humedad (y por lo tanto sobreestimación de Δd_{atm}), así como una sobreestimación la temperatura del aire cuando toca el sol de forma directa sobre el sensor en determinados momentos del día (a pesar de que el sensor se coloca cuidadosamente para que esto no ocurra). Todo ello nos lleva a modelos atmosféricos resultantes a partir de los cuales es posible cancelar parcialmente el efecto atmosférico pero siguen habiendo residuos de magnitud considerable (hasta de 6 o 7 milímetros en nuestro caso), por lo que emplear dichos modelos atmosféricos para obtener imágenes ‘libres de atmósfera’ no es una vía adecuada si queremos medir pequeños desplazamientos.
- La obtención de imágenes ‘libres de atmósfera’ es un paso previo y necesario a la obtención del valor del desplazamiento con la precisión deseada, que debe ser al menos milimétrica. **No aplicamos el modelo sobre el resto de CR’s dado que no es suficientemente preciso: no llegaríamos a obtener imágenes ‘libres de atmósfera’.**
- En todos los casos el promedio de los desplazamientos del modelo son superiores al promedio de los desplazamientos medidos con GB-SAR (tabla 19). Ello implica que en general existe una sobreestimación de los desplazamientos del modelo atmosférico, probablemente a causa de la sobreestimación de la humedad. Por otro lado la desviación estándar es parecida en ambos casos (dispersión de datos similar en ambos casos).

iv) Conclusiones sobre las observaciones GB-SAR en continuo: caracterización de la atmósfera ajustando funciones lineales y cuadráticas. Obtención de desplazamientos.

Para poder obtener imágenes Radar “libres de artefactos atmosféricos” hemos de aplicar un modelo atmosférico para cada imagen en particular, ajustando una función matemática (lineal o cuadrática) que modele el comportamiento atmosférico en función de la distancia: puntos más lejanos tienen mayor retardo de fase, es decir, mayor movimiento aparente. Para corregir cada imagen es necesario:

- **Disponer de puntos fijos** en la ladera. En este caso vamos a emplear puntos situados fuera del área estudiada (más lejanos), correspondientes a la unidad intermedia y superior de la ladera de Vallcebre, además de unos pocos puntos situados en la unidad inferior sobre la barrera de calcáreas.
- Que los puntos fijos considerados tengan **buena coherencia espacial y temporal**, una **buena respuesta en amplitud** (buena potencia de reflexión), que estén **situados a diversas distancias** y estén **libres de enrollamiento de fase**.

- Para cada imagen, disponer de **la fase medida a los puntos estables** y de la **fase medida a los puntos no estables** de los cuales buscamos hallar la componente topográfica.

Por lo tanto corregimos cada imagen a partir de la propia fase medida a puntos estables del propio interferograma.

Finalmente, para poder ‘eliminar’ la componente atmosférica de las imágenes y de este modo obtener los desplazamientos hay que tener en cuenta varios factores. A continuación se muestran una serie de conclusiones y de factores a tener en cuenta en este caso.

- Es necesario situar puntos estables sobre la ladera de estudio, verificando mediante topografía que dichos puntos son realmente estables.
- Los puntos estables deben aparecer en cada interferograma como pixeles de alta coherencia y de buena potencia de reflexión.
- Asumimos que toda la fase observada a dichos puntos estables se corresponde a artefactos atmosféricos, dado que no existe desplazamiento (obviamos el ruido).
- Podemos ajustar modelos lineales o cuadráticos. Dichos modelos cuantifican el efecto de la atmósfera sobre la fase en función de la distancia blanco-sensor para un instante de tiempo determinado (*APS versus Distancia*, ver página 106).
- El modelo cuadrático se ajusta mucho mejor que el modelo lineal, algo que puede apreciarse visualmente en las figuras 95 y 96 y observando los coeficientes de correlación R^2 , que aumentan sustancialmente en el caso del ajuste mediante dicho modelo. Por ello, el modelo cuadrático será el que empleemos para caracterizar la atmósfera en las mediciones GB-SAR efectuadas en continuo; y poder obtener finalmente el desplazamiento producido a lo largo de dicha campaña de 19 días.
- Para aplicar el modelo de corrección *APS versus distancia*, sea lineal o cuadrático, es necesario que los puntos empleados para caracterizar la atmósfera se encuentren bien distribuidos a lo largo de la imagen, es decir, que se encuentren a diferentes distancias.
- Los puntos fijos que se emplean para modelar el comportamiento atmosférico se encuentran fuera del área de estudio, a distancias superiores, concretamente en las unidades intermedia y superior de la ladera. Por ello, al aplicar el modelo sobre los interferogramas para corregir de atmósfera el resto de puntos, quedarán residuales ya que se está llevando a cabo una extrapolación.
- En la campaña de noviembre de 2010 en Vallcebre se ha podido observar que el modelo cuadrático se ajusta mucho mejor que el modelo lineal, de modo que es el modelo que se aplica para corregir las imágenes. Además se puede deducir una cierta influencia de la topografía de la ladera sobre el comportamiento de la atmósfera en estas capas bajas de la misma.
- Al corregir los puntos estables de atmósfera a partir del modelo, el resultado es aceptable y el nivel de precisión es submilimétrico. Dicha precisión se deduce calculando la desviación estándar de los resultados (desplazamientos a lo largo del tiempo, figuras 97 a la 100).

- Al corregir de atmósfera los puntos no estables mediante el modelo cuadrático, el resultado es satisfactorio. En todos los casos se observa una tendencia clara de deslizamiento de la ladera en un sentido concreto (hacia el torrente de Vallcebre, y no de otro modo) y asimismo con precisión submilimétrica (figuras 101 a la 106).
- Los desplazamientos obtenidos para las observaciones en continuo (19 días en noviembre y diciembre de 2010) son de entre 5 y 11mm en la LOS (*Line of Sight*). Dichos desplazamientos están por debajo de la media, dado que el período de observación se corresponde con un período seco (sin lluvias), por lo que es un periodo de deceleraciones en el movimiento de la ladera.
- Los desplazamientos medidos son en la LOS (*Line of Sight*), es decir, en la línea que une el blanco con el sensor. El desplazamiento total de los puntos estudiados (CR's) será mayor que los medidos con GB-SAR.
- Los desplazamientos medidos son muy pequeños y se encuentran por debajo de la precisión de medida de la estación total, por lo que no es posible realizar una validación topográfica de resultados. Además, se realizaron dos campañas de medidas topográficas durante la observación en continuo pero fueron fallidas.
- El único modo que tenemos de verificar la bondad de los resultados obtenidos, y más concretamente de asegurar que el modelo atmosférico funciona, es a partir de los resultados obtenidos tras aplicar el modelo: verificar que los puntos estables realmente lo son y que los puntos no estables siguen una evolución lógica y coherente, calculando en ambos casos la desviación tipo de los resultados (desplazamientos a lo largo del tiempo), que nos lleva a precisiones submilimétricas en ambos casos. La desviación tipo nos da la precisión de la medida efectuada en cada caso.
- No se han aceptado variaciones de fase entre imágenes consecutivas (7 minutos) superiores 3.2 mm en LOS (umbral fijado para evitar enrollamiento de fase).
- La futura comparación de los datos GB-SAR con datos de extensometría de cable, piezometría y GPS diferencial para el período de tiempo estudiado en concreto, permitirá una validación independiente de los resultados obtenidos con GB-SAR.
- En este TFC se ha podido comprobar que el GB-SAR en continuo es una herramienta que finalmente permite obtener desplazamientos desde el exterior de la ladera con una precisión elevada (submilimétrica). Otras aplicaciones del GB-SAR en el campo de la medida de desplazamientos y vibraciones en el campo de la Ingeniería Civil y la Edificación hacen interesante el conocimiento de la técnica y su consideración en esquemas o proyectos de monitorización.

v) Conclusiones sobre la monitorización de laderas inestables con GPS Diferencial

- Los métodos GPS que hemos de emplear en este caso serán los de nivel 3 (tabla 12), es decir, métodos de GPS Diferencial de precisión en los que es necesario emplear observaciones de dos o más equipos para obtener una solución.
- Dentro de las técnicas GPS diferenciales hay que decidir la técnica que queremos emplear para la obtención de coordenadas en cada campaña. En laderas donde los desplazamientos sean muy grandes puede ser suficiente el uso de RTK, mientras que

en laderas donde el movimiento es muy pequeño es probable que necesitemos emplear el método estático-rápido, algo más preciso.

- La elección del RTK puede ser la mejor solución en muchos casos; aunque nos ofrece menor precisión es un método mucho más rápido y operativo (es necesario moverse únicamente con un receptor sobre un jalón). En el caso de Vallcebre es el método de monitorización GPS más empleado.
- El uso del método estático-rápido, a pesar de que es más preciso, es de más costosa aplicación, dado que es necesario estacionar en cada punto sobre el que queremos obtener las coordenadas y esperar un cierto tiempo (10-15 minutos). Además las coordenadas se obtienen en post-proceso y no en tiempo real.
- Es importante establecer a priori unos criterios en función de la precisión requerida y de los equipos, el personal y el tiempo del que disponemos para realizar cada campaña de observación. A partir de dichos condicionantes escogeremos el método que más se ajuste a nuestras necesidades y recursos.
- Los desplazamientos de puntos de la ladera se obtienen por diferencia de coordenadas medidas en distintos instantes de tiempo. Por ello necesitamos realizar campañas cada cierto tiempo para obtener los desplazamientos que se han producido entre ambas adquisiciones de datos.
- Una de las ventajas frente a otras metodologías es que obtenemos la deformación en planimetría y en altimetría por separado, pudiendo asimismo obtener el módulo de la deformación y la dirección y sentido promedio del desplazamiento de la ladera de estudio, sin ambigüedades.
- El sistema GPS puede operar de manera automática y cuasi continua, aunque esto no está implementado en Vallcebre.

vi) Conclusiones sobre la monitorización de laderas mediante Topografía clásica

- Las técnicas topográficas terrestres convencionales son también válidas para este tipo de aplicaciones, aunque movilizan muchos más recursos y tiempo, y por lo tanto resultan poco atractivas. Actualmente no es un método empleado para la medida de desplazamientos en laderas inestables y ha sido reemplazado fundamentalmente por el GPS diferencial, con el que se obtienen resultados de precisión similar.
- Las estaciones totales también pueden operar automáticamente, aunque esto no está implementado en Vallcebre.
- La estación total realiza la corrección por temperatura y presión atmosférica en la medida de distancias de forma automática. Es necesario introducir el valor de la temperatura y la presión atmosférica antes de efectuar dichas medidas. La estación total **no** mide dichas variables, de modo que es necesario medirlas a parte.
- A lo largo de cada campaña topográfica es muy importante introducir y actualizar correctamente la temperatura en la estación total, especialmente en horas de cambios bruscos de temperatura (orto/ocaso). Las mismas indicaciones deben seguirse de cara a las variaciones de presión atmosférica, aunque ésta afecta mucho menos que la temperatura.

- Caso de no realizar dicha operación, se ha verificado empíricamente que el error que se producirá será de unos 5 mm cada 10°C de variación de temperatura a una distancia entre la estación total y el prisma reflector de 600 metros.
- Las correcciones realizadas con el distanciómetro de la Estación Total puede ser mejor realizarlas a posteriori (no en campo). Dichas correcciones se realizan en función de la temperatura y la humedad de cada momento, registrando si es posible dichas variables con 2 o 3 estaciones meteorológicas repartidas por la ladera.
- Empleamos la topografía clásica como técnica de validación de los desplazamientos obtenidos con GB-SAR, midiendo distancias geométricas con el distanciómetro de la estación total desde el GB-SAR hasta los blancos seleccionados en cada campaña, de modo que obtenemos el desplazamiento en la LOS por diferencia de distancias tomadas para cada blanco en cada campaña.
- Conviene realizar un seguimiento de puntos para verificar que el GB-SAR se asienta sobre una zona que es efectivamente estable. Asimismo es una buena manera de verificar que los puntos estables considerados en la técnica GB-SAR realmente lo son.
- Alrededor de dicha estación total también conviene establecer una red topográfica sencilla (puntos de control), para poder reubicar el punto de estación en caso de perderlo y para verificar que la ubicación del GB-SAR no está afectada por desplazamientos locales.

Referencias

- [1] Corominas, J., Moya, J., Hürliman, M. *“Landslide Rainfall triggers in the Spanish eastern Pyrenees”*. Mediterranean Storms. Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference held at Mallorca, Spain, October 2002.
- [2] Gili, J.A., Corominas, J., 1992. *“Aplicación de técnicas fotogramétricas y topográficas en la auscultación de algunos deslizamientos”*. III Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables. La Coruña, Vol. 3, pp 941-952.
- [3] Corominas, J., Moya, J., Lloret, A., Gili J.A., Angeli, M.G., Pasuto, A., Silvano S. *“Measurement of landslide displacements using a wire extensometer”*. Engineering Geology 55, April 1999.
- [4] Institut Cartogràfic de Catalunya. *Página web oficial*: <http://www.icc.cat/>. Visitada a mayo de 2011.
- [5] Corominas, J., Moya, J., Ledesma, A., Lloret, A., Gili J.A. *“Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain)”*. Landslides (2005) 2: pp 83–96. 12 May 2005. Ed. Springer-Verlag
- [6] González de Vallejo, Luis. *“Ingeniería Geológica”*. Ed. Prentice Hall. 2002. ISBN: 9788420531045.
- [7] Balasch, J.C. *La conca de Vallcebre (Alt Llobregat): anàlisi de la dinàmica geomorfològica contemporània i balanç previ de sediments*. Tesis de Llicenciatura UB, 1986.
- [8] Vila, B., Poza, B., Marmi, J., Galobart, A, Oms, O., 2006. *“La recerca paleontològica al sinclinal de Vallcebre”*. Institut Català de Paleontologia i Dep. Geologia (Estratigrafia), Fac. de Ciències Universitat Autònoma de Barcelona.
- [8b] Artículo de Wikipedia, visitado a marzo de 2010: <http://es.wikipedia.org/wiki/Sinclinal>
- [9] Instituto Tecnológico GeoMinero de España *“Mapa Geológico de España: La Pobla de Lillet. Escala 1:50.000”*. Secretaría General de la energía de recursos minerales. Ministerio de industria y energía de España, 1994.
- [10] Baeza, C. *“Evaluación de las condiciones de rotura y la movilidad de los deslizamientos superficiales mediante el uso de técnicas de análisis multivariante”*. Tesis Doctoral ETSECCPB-UPC, 1994.
- [11] Ajuntament de Vallcebre. *Página web oficial*, visitada a marzo de 2010: www.vallcebre.cat
- [12] Riera Rubio, Violeta. *“Estudio integrado (geología y paleontología) de la sucesión de dinosaurios (Maastrichtiense) de la vertiente surpirenaica”*. Tesis doctoral, 2010. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias de la U.A. Barcelona.

- [13] Corominas, J., Moya, J, Lloret, A., Gili J.A., Angeli M.G., Pasuto, A., Silvano S. "Measurement of landslide displacements using a wire extensometer". Engineering Geology 55, April 1999.
- [14] Gili, J.A. 2010. "DInSAR vs. Wire Extensometer Calibration, and GB-SAR First Survey at the Vallcebre Landslide (Spain)". Ber. Geol. B.-A., 82 – Landslide Monitoring Technologies & Early Warning Systems.
- [15] Josa, A., Suriol, J., Lloret, A. "Reconocimiento geotécnico del terreno". Edicions UPC, 2007. ISBN: 978-84-8301-942-9.
- [16] Página web <http://cuerdavibrante.blogspot.com/2007/06/sensores-de-cuerda-vibrante.html>. Visitada a marzo de 2011.
- [17] Corominas, J., Moya, J, Hürlimann, M. "Landslide rainfall triggers in the spanish eastern pyrenees". Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference held at Mallorca. October 2002.
- [18] Chuvieco Salinero, Emilio. "Fundamentos de Teledetección Espacial". 1996, Madrid. Ed. Rialp. ISBN: 9788432126802
- [19] Chuvieco Salinero, Emilio. "Teledetección Ambiental". 2010, Barcelona. Ed. Ariel, S.A.. ISBN: 978843443498
- [20] Pinilla Ruiz, C. "Elementos de teledetección". 1995, Madrid. Ed. Ra-ma.
- [21] Elachi, C., Van Zyl, J. "Introduction to the Physycs and Techniques of Remote Sensing" 2a ed. 2006, New York: John Wiley & Sons
- [22] Chuvieco, E. Y Huete, A. "Fundamentals of Satellite Remote Sensing", 2009. CRC Press.
- [23] Martínez Villar, Jorge. "Elaboración y análisis de imágenes radar desde satélite: Monitorización de deformaciones del terreno", Febrero de 2005. Trabajo Final de Carrera. Escuela Politécnica Superior de Castelldefels (UPC, Barcelona).
- [24] Yerro Colom, Alba. "Anàlisi dels moviments superficials de l'àrea de Súria per mitjà d'Interferometria Diferencial SAR (DINSAR)", diciembre de 2008. Tesina Final de Carrera. Escuela T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC.
- [25] Iglesias, Rubén. "Selección de píxeles estables mediante correlación espectral entre Sublooks para DInSAR". Octubre de 2008. Proyecto Final de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de Barcelona (UPC).
- [26] Duque, S. "Interferometría diferencial a alta resolución con imágenes SAR de los satélites ERS y ENVISAT". Trabajo Final de Carrera. ERSETB-UPC, 2005.
- [27] Jungner, Andreas. "Ground-Based Synthetic Aperture Radar Data Processing for Deformation Measurement", Minor thesis, May 2009. Royal Institute of Technology (KTH), Division of Geodesy. Stockholm, Sweden.
- [28] Skolnik, M. I., editor (1990). "Radar Handbook". McGraw-Hill Professional, New York, 2nd edition.
- [29] Michoud, C., Derron, M., Abellán, A., Jaboyedoff, M. "SafeLand. Part C: Active Microwave Sensors. Section 1: Radar Wave Principles". 2010. SafeLand – FP7. pp 105 – 107

- [30] Hanssen, R. *“Radar Interferometry”*. Kluwer Academic Publishers. Delft, The Netherlands, 2001.
- [31] Michoud, C., Derron, M., Abellán, A., Jaboyedoff, M. *“SafeLand. Part C: Active Microwave Sensors. Section 2: Interferometric Radar Distance-Meter”*. 2010. SafeLand – FP7. pp 107 – 125
- [32] Crosseto, M., Montserrat O., Pozzoli A., Gili J.A. *“Detección y medida de deformaciones del terreno utilizando interferometría diferencial SAR”*. VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Barcelona, octubre de 2009.
- [33] G. Luzi, *“Ground-based SAR Interferometry: a novel tool for Geoscience”*, pp. 01-026, in Geoscience and Remote Sensing, New Achievements, P. Imperatore & D. Riccio editors, In-the Vukopvar, Croatia, February 2010.
- [34] Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., November 2004. *“Ground-Based Radar Interferometry for Landslides Monitoring: Atmospheric and Instrumental Decorrelation Sources on Experimental Data”*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol 42, Nº 11.
- [35] Iannini, L., Guarnieri, A.M., May 2011. *“Atmospheric Phase Screen in Ground-Based Radar: Statistics and Compensation”*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol 8, Nº 3.
- [36] Gili J.A., Crosseto, M., Serral, D. *“Reflectores radar en el deslizamiento de Vallcebre. Validación y primeros resultados”*. VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Barcelona, octubre de 2009.
- [37] Michoud, C., Derron, M., Abellán, A., Jaboyedoff, M. *“SafeLand. Part C: Active Microwave Sensors. Section 3: Differential SAR Interferometry”*. 2010. SafeLand – FP7. pp 125 – 131
- [38] Hoffmann, J., Zebker, H.A., Galloway, D.L., Amelung, F., 2001. *“Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry”*. Water Resources Research, 37 (6), pp. 1551-1566.
- [39] Crossetto, M., Castillo, M., Arbiol, R., 2003. *“Urban subsidence monitoring using radar interferometry: Algorithms and validation”*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69 (7), pp. 775–783.
- [40] Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. *“A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms”*. IEEE TGRS, 42 (7), pp. 1377-1386.
- [41] Pipia, L., Fabregas, X., Aguasca, A., López-Martinez, C., Mallorqui, J.J., Mora, O. *“A Subsidence Monitoring Project using a Polarimetric GB-SAR Sensor”*. Barcelona, 2007. Signal Theory and Communications Dept (UPC).
- [42] Sandwell, D. T., Sichoix, L., Agnew, D., Bock, Y. and Minster, J.-B. (2000), *“Near real-time radar interferometry of the Mw 7.1 Hector Mine Earthquake”*, Geophysical Research Letters, 27 (19), pp. 3101-3104.
- [43] Massonet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adagna, F., Peltzer, G., Feigl, K. and Rabaute, T. (1993), *“The displacement field on the Landers earthquake mapped by radar interferometry”*, Nature, 364 (8), pp. 138-142.
- [44] Massonnet, D., Briole, P., Arnaud, A., 1995. *“Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry”*. Nature, 375, pp. 567-570.

- [45] Amelung, F., Jonson, S., Zebker, H.A., Segall, P., 2000. "Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galápagos volcanoes observed with radar interferometry". *Nature*, 407, pp. 993-996.
- [46] Goldstein, R.M., Englehardt, H., Kamb, B., Frolich, R.M., 1993. "Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream". *Science*, 262, pp. 1525-1530.
- [47] Rignot, E.J., Gogineni, S.P., Krabill, W.B., Ekholm, S., 1997. "North and northeast Greenland ice discharges from satellite radar interferometry". *Science*, 276, pp. 934-937.
- [47b] Luzi, G.; Noferini, L.; Mecatti, D.; Macaluso, G.; Pieraccini, M.; Atzeni, C.; Schaffhauser, A.; Fromm, R.; Nagler, T., "Using a Ground-Based SAR Interferometer and a Terrestrial Laser Scanner to Monitor a Snow-Covered Slope: Results From an Experimental Data Collection in Tyrol (Austria)", *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol.47, no.2, February 2009, Page(s): 382-393
- [48] Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2003. "Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique". *Engineering Geology*, 68, pp. 3-14.
- [49] Hilley, G.E., Bürgmann, R., Ferretti, A., Novali, F., Rocca, F., 2004. "Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis". *Science* 304, pp. 1952-1955.
- [50] Colesanti, C., Wasowski, J., 2006. "Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry". *Engineering Geology*, 88, pp. 173-199.
- [51] Fernández P., Jiménez J., Irigaray C., El Hamdouni R., Crosetto M., Monserrat O. and Chacón J.: "Quantitative assessment of ground deformations in the Guadalfeo River Valley and Granada Metropolitan Area (Spain) using the DInSAR technique". *Engineering Geology*, 105, pp. 84-101.
- [52] Pérez Carreras, Adrià. "Observaciones con GPS y GLONASS en el área metropolitana de Barcelona". Trabajo Final de Carrera de I.T. Topográfica. Febrero de 2008.
- [53] Russian Space Agency (RSA). *GLONASS Official Website*; <http://www.glonass-ianc.rsa.ru>. Visitada a marzo de 2011.
- [54] Navigation Center USA (NAVCEN). *NAVSTAR-GPS Official Website*; <http://www.navcen.uscg.gov/>. Visitada a marzo de 2011.
- [55] Habrich, Heinz. "Geodetic Applications of the Global Navigation Satellite System (GLONASS) and of GLONASS/GPS Combinations". Bern University: November 1999.
- [56] Dana, Peter H. *Oficial Website*: <http://www.pdana.com/>. Visitada a marzo de 2011.
- [57] Gili, J.A. "Instrumentación para control de movimientos de ladera: sistema GPS y otros". Operatividad en la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos. IGME, Madrid 2003. ISBN: 84-7840-485-6
- [58] United States Naval Observatory (USNO). *Official Website*: <http://www.usno.navy.mil/>. Visitada a marzo de 2011.

- [59] Coordination Scientific Information Center (CSIC), *“GLONASS Interface Control Document (ICD)”*. Version 5.0. Moscow, 2002.
- [60] Leick, Alfred. *“GPS Satellite Surveying”*. Third Edition. New Jersey (USA): Ed John Wiley & Sons, 2004. ISBN 0-471-05930-7.
- [61] Gili, J.A., Corominas, J., Rius, J. *“Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring”*. Engineering Geology 55, 2000.
- [62] Rodríguez Jordana, J.J., *“Estadística y ajuste de observaciones: Los mínimos cuadrados aplicados a la topografía”*. Edicions UPC. Barcelona, 1998.
- [63] Institut Cartogràfic de Catalunya. *Página web oficial*: <http://www.icc.cat/cat/Home-ICC/Inici/Geodesia/CatNet>
- [64] Gili, J.A., Corominas, J., 1992. *“Aplicación de técnicas fotogramétricas y topográficas en la auscultación de algunos deslizamientos”*. III Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables. La Coruña, Vol. 3, pp 941-952.
- [65] Geotronics AB, *“Manual de usuario: Geodimeter 600”*. Mayo de 1997. Número de publicación 571 701 126.
- [66] Ortofotografía: *“Institut Cartogràfic de Catalunya”*. Aplicación: *Google Earth*. Fuente: *“Institut de Geomàtica”*.
- [67] Rüeger, J. M. Refractive index formulae for radio waves. *“In Integration of techniques and Corrections to Achieve Accurate Engineering”*, Proc. XXII FIG Int. Congress ACSM/SPRS Ann. Conf., Washington DC, USA, Apr 19-26, 2002.