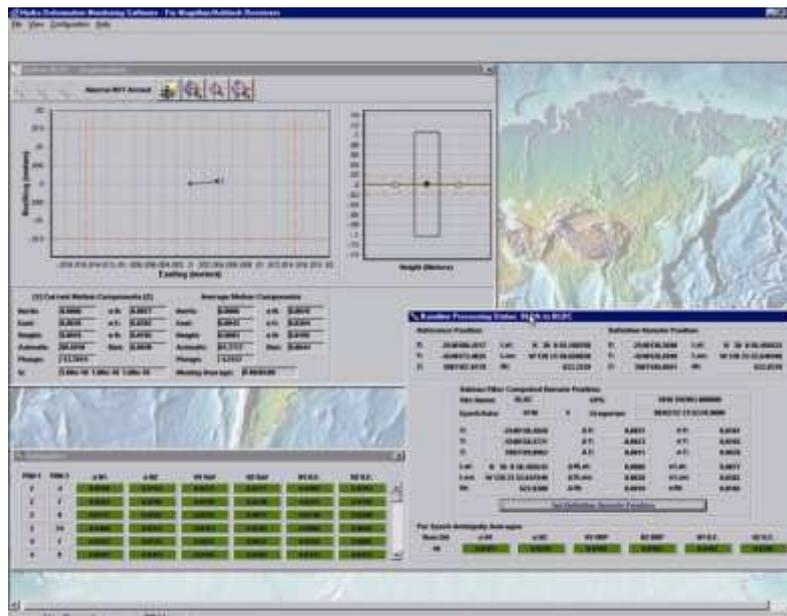




ImberControl Aplicación de las alternativas tecnológicas disponibles para el control de desplazamientos de terrenos y grandes estructuras

Aplicación de las alternativas tecnológicas disponibles para el control de desplazamientos de terrenos y grandes estructuras



Jesús Martínez
Ricardo Cifres
Enero 2008



Aplicación de las alternativas tecnológicas disponibles para el control de desplazamientos de terrenos y grandes estructuras

Introducción

La ejecución de obras de ingeniería casi siempre introduce modificaciones importantes en la estructura de los terrenos donde se ubican. Así, obras como las presas, túneles, grandes desmontes viarios, etc., suponen un cambio de las condiciones de estabilidad existentes, que en ocasiones han originado grandes movimientos de terreno y en algunos casos la ruina de la obra ejecutada.

Los proyectos deben contemplar en la fase de diseño, las hipótesis de las condiciones geotécnicas que se derivan de la construcción de la propia obra, recogiendo las medidas necesarias que garantizaran la viabilidad del proyecto.

Como consecuencia, la realización de estos proyectos de ingeniería, conlleva la necesidad de, durante la construcción y en ocasiones posteriormente durante la vida útil de la obra, controlar la estructura y sus posibles afecciones al terreno, contrastando las hipótesis del diseño, y modificándolas si fuese preciso.

Auscultación

Los trabajos necesarios para el control del comportamiento de los terrenos afectados por la obra y de la propia obra, suelen englobarse bajo el concepto de auscultación, que implica la ejecución de una serie de trabajos, entre los cuales, cabe destacar:

- Predicción del comportamiento de la estructura y de los terrenos afectados.



- Elección de las magnitudes cuyo control resulta significativo para reflejar simplifadamente el comportamiento, y que por tanto, estarán sujetas a medición.
- Definición de los instrumentos adecuados para medir las magnitudes elegidas para el control. Dichos instrumentos dependen del rango (valor esperado), precisión requerida y frecuencia de lectura, así como de otros condicionantes como características topográficas, factores económicos, etc.
- Instalación de los instrumentos elegidos y lectura de los mismos.
- Comparación de los valores previstos con los reales. Análisis de datos, y modificación, si procede, de las hipótesis efectuadas para la predicción del comportamiento de la obra y del terreno (contrastación experimental del diseño y modificación si procede).

Dentro de las magnitudes que se deben medir para el control de desplazamientos de terreno y grandes estructuras están los movimientos superficiales.

Sistemas de Medida

Para la medida de movimientos superficiales se han venido utilizando de forma general los siguientes métodos:

- Métodos geodésicos: Triangulación, trilateración y poligonización, que permite medir movimientos horizontales y verticales.
- Nivelación: Permite medir únicamente movimientos verticales.
- Colimación: Permite medir movimientos horizontales en una sola dirección.

Cada problema a controlar tiene sus particularidades y tanto la elección del método más apropiado como la ubicación de los equipos de medida son fundamentales para la obtención de unos buenos resultados.



La elección del sistema de medida y de los equipos a utilizar dependerá fundamentalmente de la precisión que se desee alcanzar, que a su vez dependerá de la magnitud de los movimientos que se quieren controlar.

En el caso de desplazamiento de terrenos y grandes estructuras, puede ser interesante controlar movimientos pequeños con precisiones inferiores al cm., siendo importante conocer la evolución de los movimientos en las tres dimensiones. Los métodos que se detallan a continuación son en la actualidad los más innovadores a la hora de la toma de medidas en tiempo real y su análisis y procesamiento.

No existe una técnica universal que sea óptima para todas las aplicaciones. Cada una tiene unas ventajas y unos inconvenientes así como unos límites, de modo que, dependiendo de la extensión a medir, de la precisión requerida o de la duración del estudio, unas u otras técnicas resultarán más adecuadas. Explicaremos a continuación las redes GPS diferenciales, el sistema InSAR y la inclinometría superficial de alta precisión.

Redes diferenciales GPS

La tecnología de red GPS diferencial nos permite obtener coordenadas absolutas en los tres ejes con una precisión milimétrica en tiempo cuasi real dependiendo de las condiciones del entorno, con una repetitividad perfecta aún tras largos periodos de tiempo. Nos permite también una adquisición de datos completamente autónoma y automatizada de modo que no requiere de intervención humana para su funcionamiento.



Figura 1



El sistema GPS diferencial

Los satélites GPS que orbitan la Tierra envían unas señales codificadas hacia la superficie. Los receptores GPS reciben esas señales y cuando captan la señal de cuatro o más satélites, pueden calcular su posición con un cierto margen de error. Estos errores, debidos a diversos factores, son equivalentes para receptores cercanos entre sí.

Por esta razón, un receptor GPS estático que conoce su posición exacta es capaz de determinar ciertos parámetros relativos a estos errores, para aplicarlos a las mediciones realizadas por receptores cercanos.

Historia

Sobre este principio denominado GPS diferencial (DGPS) se han desarrollado multitud de técnicas para obtener precisiones dentro de un rango admisible para los requerimientos cada vez más estrictos de la ingeniería. En este ámbito se han creado un número reducido de paquetes software para la gestión de redes GPS con los que se obtienen resultados muy precisos.

Las primeras compañías en desarrollar estos programas aprovecharon los estudios llevados a cabo por ciertas universidades de California dedicadas a la monitorización de los movimientos tectónicos que afectan al suroeste de California.

Después de estos primeros desarrollos, viendo el potencial de esta tecnología, otras compañías, principalmente fabricantes de sistemas GPS para topografía han desarrollado sus propios programas para aprovechar al máximo las prestaciones de sus receptores pero habilitadas para trabajar únicamente con sus propios equipos.

De entre estos desarrollos destaca, por ser pionero y por tanto, por su larga experiencia en la materia, 3dTracker. Este software, fruto de los primeros estudios realizados en California, fue desarrollado por una compañía con gran



ImberControl Aplicación de las alternativas tecnológicas disponibles para el control de desplazamientos de terrenos y grandes estructuras

experiencia en geotecnia, topografía y GPS. Posteriormente, este sistema y todo su equipo de desarrollo fueron adquiridos por Pinnacle Technologies, empresa líder en los estudios del terreno para la industria petrolífera y con un potencial de desarrollo muy superior.

Como parte del sistema de supervisión de deformación PinnPoint, la capacidad del GPS de Pinnacle proporciona sensibilidad a nivel milimétrico con operación en continuo automatizada en localizaciones remotas y desatendidas. A diferencia de otros sistemas GPS del mercado, el sistema Pinnacle combina el bajo ruido y la estabilidad de un motor de proceso con la técnica de filtración propia de Pinnacle para proporcionar resultados que realmente estén optimizados para medir la deformación superficial originada por procesos sub-superficiales. Para las aplicaciones que requieran supervisión de detección de movimientos geotécnicos, de infraestructuras o de peligro en tiempo real, nosotros ofrecemos ahora nuestra tecnología propia 3D-Tracker GPS. Este nuevo sistema GPS combina medidas de alta sensibilidad en tiempo real con estabilidad a largo plazo implementando un filtro Kalman puesto a punto a medida con mediciones de fase del portador de doble diferencia calculadas en un cierto plazo (conocido como triple diferencia). Solamente Pinnacle ofrece una gama de capacidades de supervisión por GPS tan completa que puede ser adaptada específicamente a las necesidades de cualquier proyecto.

Este programa obtiene soluciones con una frecuencia de hasta 20Hz y proporciona una interfaz de usuario muy intuitiva y fácil de manejar que permite ver con gran claridad el estado actual de los puntos de medida. Es también altamente escalable, de modo no hay límite en el número de estaciones a controlar en el caso de grandes instalaciones. Asimismo es independiente del fabricante de los receptores GPS.



Funcionamiento

Las redes GPS diferenciales constan de tres elementos fundamentales:

1. Receptores GPS
2. Medio de transmisión de datos
3. Sistema de proceso de datos

Este esquema se resume en la siguiente ilustración

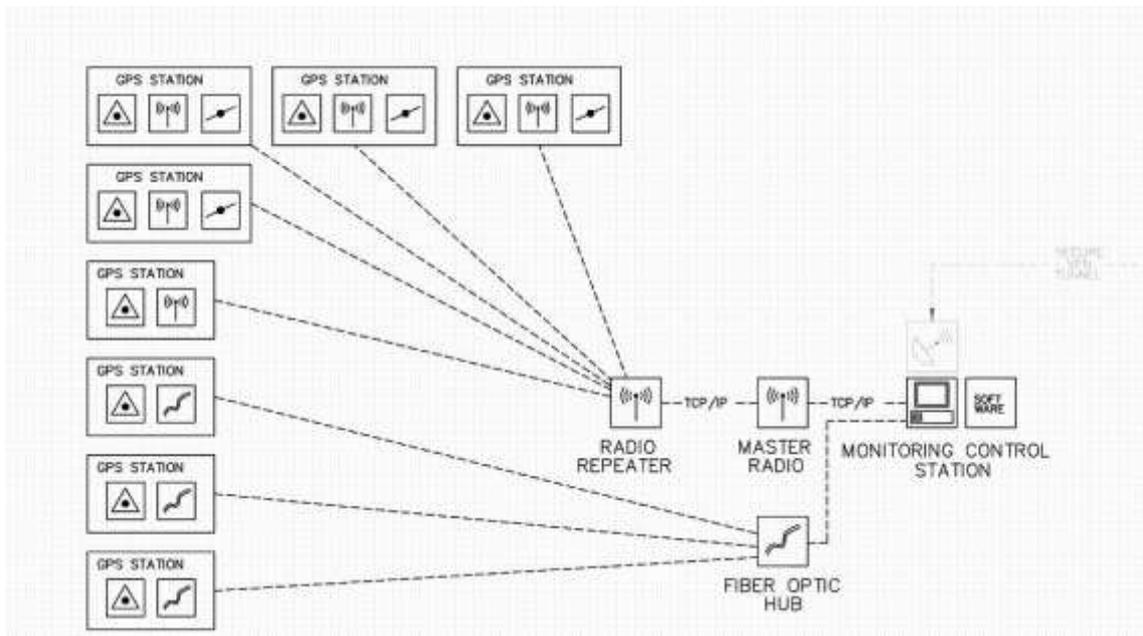


Figura 2

1. Receptores GPS

Son receptores GPS convencionales aunque conviene que sean de la mejor calidad y precisión posibles. Los receptores no necesitan incorporar ningún tipo de prestación diferencial ya que el procesado se llevará a cabo externamente. Dependiendo de la ubicación se podrán alimentar de la red eléctrica o tendrán que incorporar un sistema de alimentación alternativo como paneles solares. El GPS puede complementarse con un clinómetro para controlar movimientos del monumento donde esté instalado (Figura 1).



2. Medio de transmisión

Los datos de salida de los receptores GPS y, eventualmente, de cualquier otro dispositivo complementario tienen que llegar al sistema de procesado. Dependiendo de la topología de la instalación se elegirá el medio más adecuado, desde una conexión serie directa al ordenador hasta cualquier medio de transmisión sobre el que se pueda implementar el protocolo TCP/IP como red Ethernet de cobre o fibra, redes WiFi, líneas telefónicas, GPRS o incluso internet.

3. Sistema de proceso de datos

Este sistema consiste en un equipo informático donde corre la aplicación 3dTracker, que es el corazón del sistema. La aplicación consta de dos procesos fundamentales. El primero se comunica con el receptor GPS, lo configura y adquiere los datos de él. El segundo proceso se conecta con el primero para recibir en tiempo real los datos del GPS en un formato independiente del fabricante del receptor.

Además de la obtención de los movimientos en tiempo real, el sistema es capaz de lanzar alarmas en función de la cantidad de movimiento o de la aceleración del mismo. Estas alarmas pueden activar el envío de un e-mail, SMS o cualquier otro medio de comunicación que implementemos en el equipo.

En la figura 3 se puede ver la pantalla del programa con tres de sus principales ventanas abiertas.



Aplicación de las alternativas tecnológicas disponibles para el control de desplazamientos de terrenos y grandes estructuras

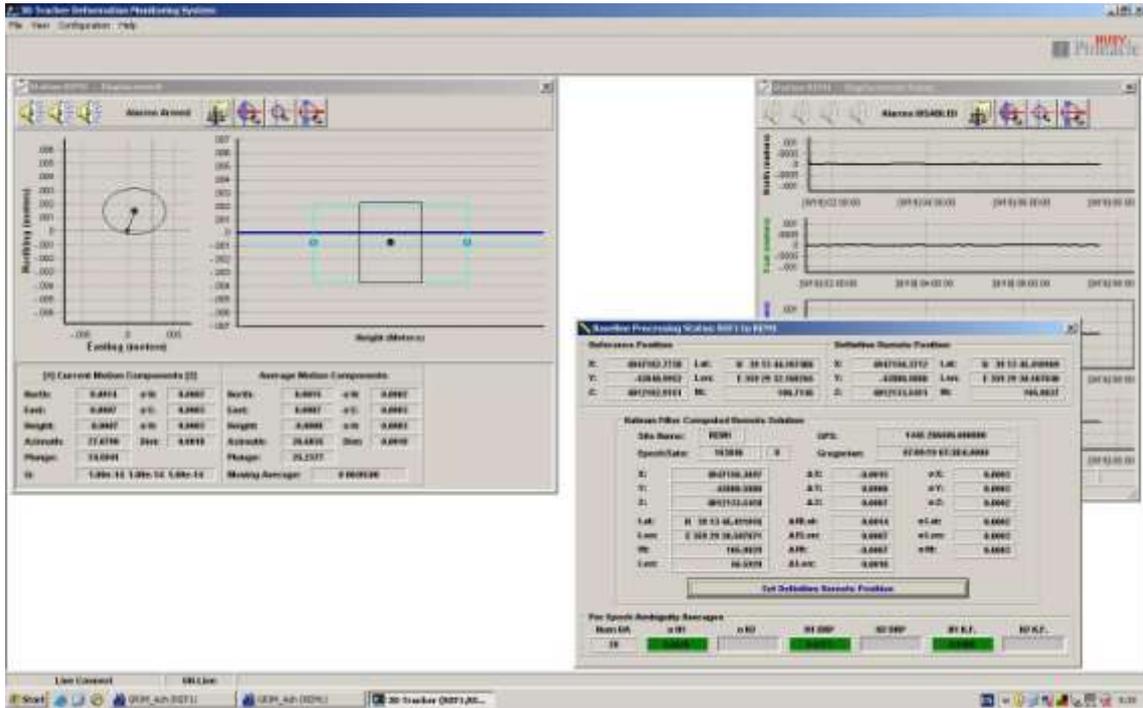


Figura 3

InSAR por satélite

En cooperación con el líder en medición remota con sensores MDA Geospatial Services, Pinnacle/Intercontrol ofrece una gama completa de herramientas InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) que pueden ser integradas completamente con nuestros diagnósticos PinnPoint existentes de inclinación y GPS. InSAR es una técnica de supervisión relativamente nueva que se puede utilizar para obtener mapas de deformación superficial de alta resolución espacial. Las medidas con InSAR se obtienen por sensores activos de microondas llevados al espacio que son capaces de funcionar en todas las condiciones ambientales y de iluminación (figura 1 en la página anterior). A pesar de que la máxima resolución de mapeo de un producto InSAR es impresionante (tamaño de píxel 10 metros), el verdadero poder de esta técnica reside en su enorme cobertura espacial. El tratamiento de las imágenes individuales del radar puede cubrir un área de hasta 100 x 100 km. Hasta la fecha, ninguna otra técnica geodésica rivaliza con la capacidad de InSAR para medir deformaciones en extensas áreas de la superficie terrestre. La



capacidad para medir la deformación superficial sobre áreas incluso mayores se puede conseguir empalmado un mosaico de varias escenas individuales del radar. Un beneficio añadido de incrementar el número de imágenes adquiridas por el radar en una región de interés es una reducción en el intervalo de supervisión de 24 días a menos de una semana.

InSAR: Cómo funciona

Los satélites radar (SAR) que orbitan la Tierra proyectan un rayo de energía microonda a la superficie de la Tierra y recibe la porción de este rayo que es reflejada por las fracciones sólidas, como rocas y suelo. Esta energía reflejada a menudo se utiliza para generar una imagen, o dibujo, de la superficie basada en qué cantidad de rayo es reflejada. Las superficies duras y ásperas reflejan normalmente más porción del rayo y esto se refleja en un mayor brillo en la imagen. La intensidad, sin embargo, es solamente la mitad de la información contenida realmente en la energía reflejada de vuelta al satélite SAR. De importancia crucial es la fase de la microonda reflejada (Figura 2). En su similitud más simple, la fase de una microonda se relaciona con las marcas de una regla. Las oscilaciones regulares de una microonda viajando a través del espacio proporcionan una referencia con la cual las distancias pueden ser medidas, y la longitud de onda de una microonda es como el tamaño de una regla estándar. Cada frecuencia de la microonda tiene su propia y única longitud de onda, y el receptor del satélite es capaz de medir la fase, o la posición exacta en la microonda reflejada, en el momento que es recibida por la antena del satélite. Si la distancia entre el satélite y un punto específico de la superficie terrestre no cambiara nunca, la fase de la microonda debería ser siempre la misma. Sin embargo si esta distancia cambia, por los movimientos del satélite o por la deformación de la superficie terrestre, la fase de las ondas reflejadas cambiará en proporción al cambio de distancia. Si uno tiene suficiente conocimiento de la posición exacta del satélite en su órbita, entonces la cantidad con que un punto de la superficie terrestre se mueve en un periodo de tiempo dado puede ser calculada midiendo el desfase de la



microonda reflejada desde ese punto (Figura 2). De acuerdo con este principio, las medidas de cambio de fase tomadas para miles de puntos de la superficie terrestre se utilizan para producir una imagen InSAR, o interferograma, que muestra el movimiento en áreas muy grandes.

PSI: Utilizar puntos objetivo para aumentar las capacidades de supervisión del InSAR

Mientras que el InSAR tradicional es adecuado para muchas regiones de la superficie terrestre, hay igual regiones donde no. El éxito con interferometría confía en la capacidad de observar medidas coherentes de fase de imagen a imagen. Muchas campañas que supervisan a largo plazo se dan lugar en regiones que están plagadas de vegetación excesiva, cubiertas de nieve,

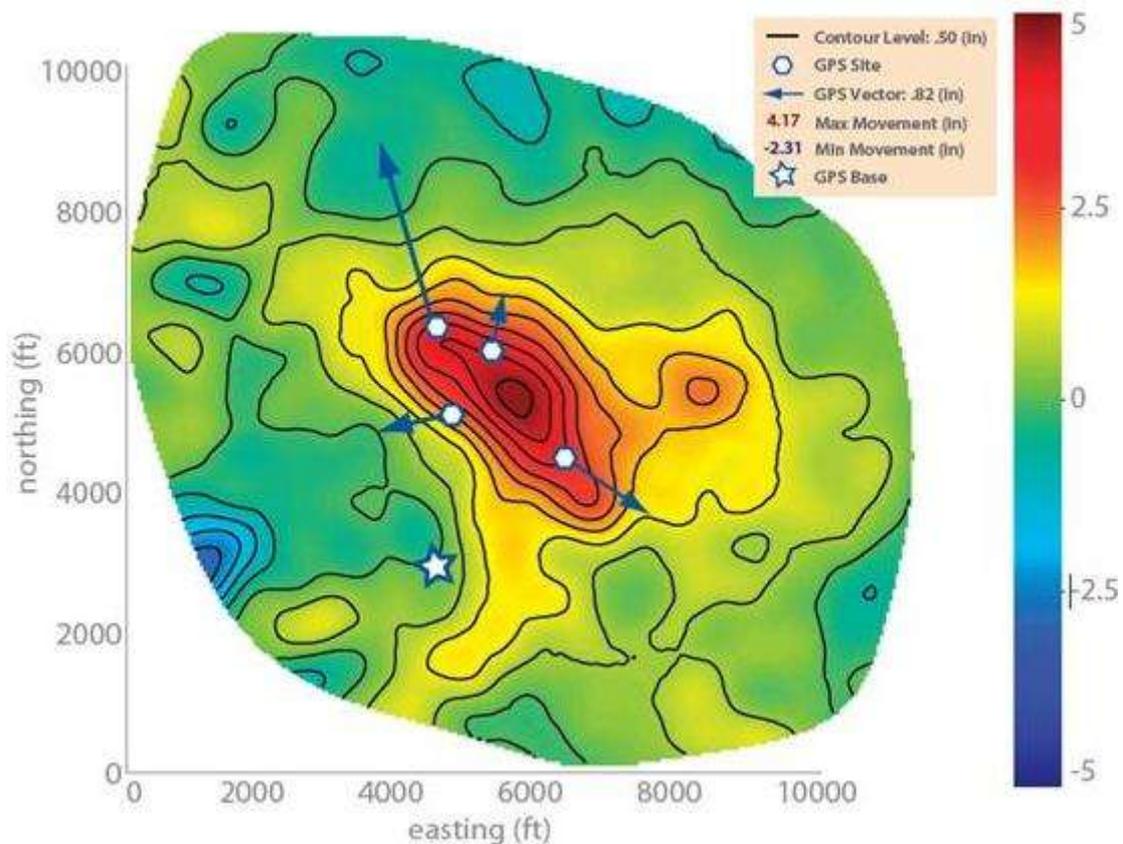


inundadas o con movimientos de tierras inducidos por el hombre. Todos estos fenómenos pueden degradar la coherencia interferométrica. La solución a este dilema es el PSI. Esta técnica utiliza la misma tecnología que el InSAR tradicional, pero toma mayor ventaja de los puntos objetivo (Figura 4) que producen una señal de retorno SAR estable (dispersión permanente) todo el tiempo. PSI es ideal en áreas que tienen una alta densidad de puntos objetivo como son edificios, torres, presas, diques y tuberías de distribución. Ciertos elementos naturales, como la roca expuesta, pueden ser también utilizados. Cuando dispersiones de puntos existentes previamente no se encuentran disponibles, se pueden instalar reflectores de esquina (Figura 5) económicos en localizaciones estratégicamente posicionadas. ¡Cuando se co-localizan con GPS u otro equipamiento de diagnóstico de supervisión, se puede obtener un campo completamente integrado de deformación en regiones que se pensaban inaccesibles a las campañas de supervisión manual.



Integración con las observaciones PinnPoint de clinómetros y GPS

Mientras que los principios fundamentales sobre los que funciona InSAR son algo simple, la implementación de estos principios en una campaña exitosa de medición es cualquier cosa menos fácil. Herramientas analíticas sofisticadas y la pericia de Pinnacle/Intercontrol son necesarias para ocuparse de las numerosas fuentes de interferencia, condiciones de cambio de campo, etc. que pueden afectar a la producción de resultados significativos. Cada interferograma está limitado al movimiento unidimensional en el cual toda la deformación vertical y lateral en cada píxel se proyecta sobre la línea de visión del SAR. Aplicando una comprensión de los movimientos geomecánicos a un proyecto con nuestras capacidades propias de integración de inclinación y GPS, podemos presentar una representación de la deformación de la tierra más rica y de mayor precisión (Imagen en la siguiente página).



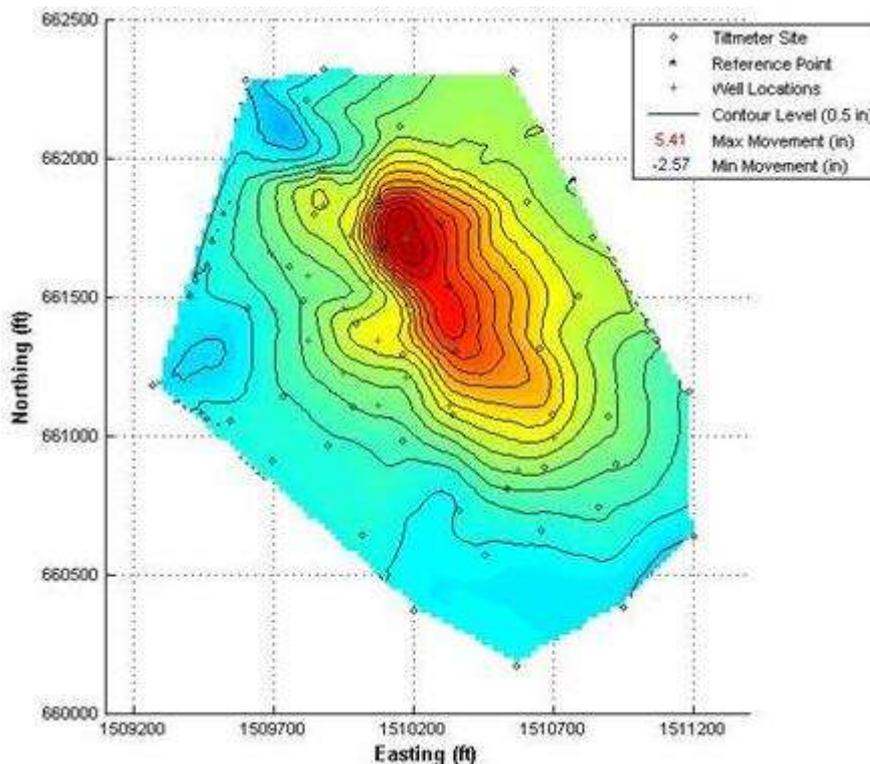


Tierra verdadera

La estabilidad a largo plazo del GPS, y el hecho de que constituye una medida directa de la posición (no indirecta basada en la forma de la deformación) lo hacen una fuente ideal de conocimiento de la verdadera tierra en 3 dimensiones para obligar a los focos desconocidos o potenciales de inestabilidad inherente con otras técnicas de medida. De esta manera, el GPS de Pinnacle es un complemento ideal para nuestro conjunto de tecnologías, aumentando sus habilidades y mitigando defectos, para producir un sistema compuesto con características verdaderamente notables (Tabla 1).

Clinómetros superficial

Los clinómetros superficiales de Pinnacle tienen una precisión tan elevada que son capaces de detectar una elevación de 0.005 mm por kilómetro. Con esta resolución, una red de clinómetros estratégicamente distribuida es perfecta para detectar movimientos del terreno de subsidencia o elevación con una enorme precisión. A continuación se muestra una representación de movimientos detectados únicamente con una red de clinómetros.





Se han descrito tres de las más recientes tecnologías para la supervisión de movimientos del terreno o grandes estructuras. La experiencia de Pinnacle/Intercontrol permite la integración de estas tres tecnologías para obtener resultados altamente fiables y clarificadores de los procesos subsuperficiales.

Comparativa de prestaciones de las diferentes tecnologías descritas

	Interferometría por Radar Sintético de Apertura (InSAR)	Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	Clinometría de precisión
Descripción	Compara el cambio de fase entre pulsos del radar reflejados recogidos entre diferentes pasadas de los satélites espaciales	Mide directamente la deformación superficial utilizando una red de receptores superficiales y una constelación de satélites	Mide el gradiente (inclinación) de deformación utilizando un conjunto de clinómetros
Sensibilidad	Desplazamiento por debajo del centímetro	1 mm de desplazamiento	0.005 mm/Km de desplazamiento vertical
Fortalezas Clave	<ul style="list-style-type: none">• Amplia cobertura espacial• No requiere instrumentación en tierra• Capacidades de supervisión mensuales	<ul style="list-style-type: none">• Funciona de manera continua• Funciona en la mayoría de las condiciones atmosféricas• Desplazamiento en 3D• Estabilidad a largo plazo	<ul style="list-style-type: none">• Funciona de manera continua• Consume muy poca energía• Medidas no influenciadas por el tiempo atmosférico

Tabla 1. Comparativa entre las tres tecnologías

Autores:

Jesús Martínez Ortega - *Geólogo*

Ricardo Cifres Giménez - *Ingeniero Informático*

Intercontrol Levante, S.A. (Valencia, ESPAÑA)

Pinnacle Technologies Inc. (Houston TX, EE.UU.)