

CONTROL DE LA SUBSIDENCIA MEDIANTE SISTEMA GPS EN LA ZONA MINERA DE BALSARENY Y SALLENT

Lluís Sanmiquel Pera¹, Joaquín Edo Tomás¹, Modesto Freijo Álvarez², Ignacio Cabal Naves³

¹Cátedra "Iberpotash" en minería sostenible. Universidad Politécnica de Cataluña. sanmi@emrn.upc.edu, edo@emrn.upc.edu. ²Cátedra "Iberpotash" en minería sostenible. Universidad Politécnica de Cataluña.

³Cátedra "Iberpotash" en minería sostenible. Iberpotash, S.A. icabal@iberpotash.com.

Abstract

Se ha realizado en el año 2008 una campaña de mediciones y control de la subsidencia producida por las labores mineras subterráneas en una zona de unos 36km², de los municipios de Sallent y Balsareny. Estas mediciones se han realizado mediante la tecnología GPS, habiéndose comparado los resultados con los obtenidos en anteriores campañas de medición, realizadas en los años 1990, 1995 y 2003 mediante mediciones topográficas convencionales. En la campaña del año 2008, se ha ampliado considerablemente la colocación de puntos de control, tanto de densificación de la zona inicial como sobre todo, de zonas nuevas, al objeto de tener nuevas referencias para futuras campañas. Las medidas de los puntos de control de la campaña del 2008 se han realizado mediante un conjunto de 4 receptores GPS de doble frecuencia.

El objetivo de la ponencia será la descripción de la metodología empleada en la medida mediante los receptores GPS, así como la metodología de topografía clásica utilizada en la medida de aquellos puntos de control que por su situación no ofrecían una recepción adecuada de la señal emitida por los satélites. Se compararán las medidas de los puntos de control que se pueda entre las diversas campañas indicadas, y se mostrará mediante tablas y gráficas la evolución de la subsidencia en los puntos indicados. Un buen conocimiento de la evolución de la subsidencia que afecta una zona en concreto es un elemento clave para poder hacer una planificación territorial adecuada de la misma, teniendo en cuenta este elemento de riesgo.

Palabras Clave: Subsidencia, Punto de control, Altitud ortométrica, Altitud elipsoidica.

1. Introducción

La empresa IBERPOTASH, S.A. tiene actualmente una mina en la zona de Sallent-Vilaforns, la cual dispone de 2 pozos (uno en Sallent y el otro a Vilaforns), así como una rampa en la zona de Sallent. El método de explotación de esta mina es por cámaras y pilares. Esta actividad minera, mediante la excavación del mineral, genera vacíos dentro de una masa halocinética que implica un progresivo cierre de estos vacíos. El cierre de las cavidades o vacíos, es consecuencia de la velocidad de convergencia, que es variable en los diferentes zonas de la mina. Las variables que modifican esta velocidad son función de la profundidad, pendiente y potencia de los estratos, entre otros. La experiencia en la cuenca potásica catalana pone de manifiesto, que un vacío puede quedar totalmente cerrado en un periodo de tiempo comprendido entre 10 y 15 años.

La consecuencia directa del cierre de las galerías y cámaras generadas en el proceso de explotación, es una transmisión hacia los estratos superiores de un movimiento de hundimiento. Este hundimiento acaba llegando a la superficie dando lugar a lo que se nombra "subsidencia" o desplazamiento superficial de un terreno debido a un fenómeno natural o debido a una actividad humana. En nuestro caso es debido a una actividad minera.

La subsidencia de un terreno debido a una actividad minera es compleja de modelizar, debido a la dificultad de expresar matemáticamente el efecto conjunto de las variables que intervienen en una subsidencia determinada. Entre estas variables destacan: el método de explotación de la actividad minera, dimensiones de los vacíos generados, la naturaleza y buzamiento de los estratos geológicos situados entre la mina y la superficie, la profundidad de la mina... Un dato fundamental para poder llegar a hacer una modelización adecuada de la subsidencia de una zona es el de disponer de medidas topográficas precisas que permitan conocer la velocidad del desplazamiento del terreno. Es por ello, que la dirección de la empresa Iberpotash, ha encargado a la Cátedra "Iberpotash" en minería sostenible de la UPC, la realización de medidas topográficas a una serie de puntos de control distribuidos en un ámbito geográfico, presuntamente afectado por fenómenos de subsidencia, de cara a poder calcular los desplazamientos que

puedan estar sometidos como consecuencia de la actividad minera. La comparación de las medidas con las efectuadas en años anteriores permitirán calcular el desplazamiento y la velocidad del mismo.

2. Objeto del estudio.

Se pretende mediante un estudio topográfico llegar a conocer el desplazamiento vertical del terreno (subsistencia) en la zona minera de los municipios de Balsareny y Sallent. Para poderlo llevar a cabo, la empresa Iberpotash facilitó las coordenadas planimétricas y altimétricas de una serie de puntos que desde hacía años ya estaban situados en el terreno y que se habían medido en una o varias campañas de mediciones. El trabajo ha consistido pues en calcular la altitud actual de estos puntos y compararla con la de años anteriores, si ello era posible. Allí donde los puntos de control habían desaparecido se colocaron nuevas señales y se midieron para poderlas comparar en futuras campañas. En total ha habido 98 puntos que no se han podido localizar en el terreno. La mayoría de estos puntos estaban situados al lado de pistas forestales y carreteras. También, fue objeto de este estudio el ampliar la zona de análisis en dirección hacia donde han avanzado las labores de la mina.

3. Metodología empleada

Para la realización del estudio se exigió una precisión de cota de $\pm 2\text{cm}$. A partir de la tolerancia indicada se pensó en el método topográfico más idóneo, teniendo en cuenta el volumen de trabajo a efectuar (medida de unos 600 puntos distribuidos mayoritariamente en una zona forestal y agraria de 3660 ha). Haciendo las consultas pertinentes a técnicos de casas comerciales de aparatos topográficos y técnicos del Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) se determinó de cara a tener una calidad de precisión adecuada en las medidas, así como en la operatividad de las mismas, que la metodología más idónea fuera una basada en el sistema de posicionamiento global (GPS). Concretamente, el método que se utilizó fue el diferencial estático en post proceso y se describe acto seguido:

- Se utilizaron 4 receptores GPS de doble frecuencia de la casa comercial Topcon. Dos receptores, se colocaban en 2 puntos de coordenadas planimétricas y altimétricas conocidas (bases), y los otros 2 (rovers) se utilizaban para hacer las medidas de los puntos de control. El tiempo de medida mínima por cada punto de control fue de 10^m . Así, en toda una sesión de 3-5 horas, según los días, los 2 receptores situados en los puntos conocidos medían constantemente durante todo el tiempo, de tal manera que cualquier medida efectuada por los receptores móviles de los puntos de control era simultánea con la medida de los 2 receptores bases. Eso, permitía, que en el cálculo de los puntos en post proceso, mediante el software "Topcon Tools", se pudiera hacer el cálculo por mínimos cuadrados y tener así la máxima precisión.

Los 2 puntos bases se ubicaron en las instalaciones de la empresa Iberpotash, de Sallent y Vilaforns. Se construyó un pilar de hormigón en cada recinto con una rosca universal en el centro de cada pilar, para poder sujetar las plataformas nivelantes de los receptores bases GPS, pudiendo hacer así estación con unas condiciones óptimas. Esto era básico, pues los días de medición fueron muchos, y era primordial que los errores de estacionamiento fueran mínimos. Estos 2 puntos se llamaron "Base Sallent" y "Base Vilaforns". Inicialmente no conocíamos sus coordenadas, pues eran dos puntos nuevos, y por lo tanto, las primeras medidas que se efectuaron fueron las de las dos bases. Para hacerlo, se colocó en cada base, un receptor "rover" GPS. Los receptores "base" se colocaron en unos puntos conocidos, situados fuera del ámbito de influencia de la subsidencia y que técnicos de la empresa Iberpotash, habían utilizado como puntos de partida en campañas anteriores de medidas topográficas. Estos 2 puntos de partida, que se utilizaron para poder calcular las coordenadas de los 2 puntos base (pilares de hormigón) de Sallent y Vilaforns se llaman "Torre eléctrica" y "Puente". El tiempo de medida fue de unas 3 horas. Es decir, durante 3 horas, 4 receptores GPS estuvieron midiendo simultáneamente. Eso permitió, poder tener una precisión muy grande (muy superior a la precisión exigida). Se actuó así, porque los 2 puntos "Base Sallent" y "Base Vilaforns" tenían que ser la base de las medidas de todos los puntos de control del trabajo. Se escogieron las dos bases indicadas, fundamentalmente por dos razones: por una parte los 2 puntos están situados en una zona muy central del ámbito territorial afectado por la subsidencia, y por otra parte, como razón principal, porque los 2 puntos se encuentran dentro de los recintos industriales que la empresa Iberpotash tiene en Sallent y Vilaforns. Eso, nos permitió no tener que destinar ninguna persona a hacer tareas de vigilancia de los receptores bases GPS.

El pasado 30 de agosto de 2007 entró en vigor el Real Decreto 1071/2007, el cual establece que toda la cartografía que se elabore en el estado español a partir de la fecha indicada podrá basarse, aparte del sistema geodésico de referencia ED50, en el sistema geodésico de referencia ETRS89. Toda cartografía realizada en el estado español desde el 30 de agosto de 2007 hasta el 31 de diciembre de 2014 podrá basarse en las 2 sistemas geodésicos. A partir del 1 de enero de 2015, la cartografía española sólo podrá basarse en el sistema geodésico de referencia ETRS89.

Teniendo en cuenta, lo que se ha indicado, los técnicos responsables de este trabajo hemos creído necesario calcular también, las coordenadas cartográficas de las bases y puntos de control en el sistema cartográfico UTM basado en el sistema geodésico de referencia ETRS89, aparte del sistema ED50. Asimismo, también hemos creído necesario, aparte de calcular las altitudes ortométricas de todos los puntos objetos de medición, calcular sus altitudes elipsoidicas. La ventaja que vemos al trabajar en altitudes elipsoidicas es la de qué directamente son las altitudes medidas por el sistema GPS. No es necesario transformarlas en ortométricas, en base a los datos de un determinado geode. Eso hace que no haya ningún error de transformación, y se consiga, aparte, de una mejor precisión, una mejor homogenización cuando se comparen las altitudes de los puntos medidos este año, con las medidas a efectuar en el futuro. Eso es así, porque cada año el ICC suministra nuevos datos más precisos del geode en Cataluña, y por lo tanto los parámetros de transformación de las altitudes elipsoidicas a altitudes ortométricas, aunque poco, van variando. En el presente trabajo hemos utilizado los datos del geode CAT10060, suministrados por el Instituto Cartográfico de Cataluña, para poder calcular las altitudes ortométricas.

4. Calculo de las bases “Sallent” y “Vilaforns”

Las bases se midieron 3 veces. La primera vez el mes de marzo, y las otras dos veces en los meses de abril y septiembre. Eso se hizo porque los 2 puntos se encuentran situados dentro del ámbito de influencia de la subsidencia, y por lo tanto, era necesario conocer el posible desplazamiento de las bases para ir corrigiendo las coordenadas.

12 de marzo de 2008

En este día se efectuó la medida de las dos bases "Base Sallent" y "Base Vilaforns" desde los puntos "Puente" y "Torre eléctrica". Ante el peligro de que pudiera desaparecer el punto PUENTE, al encontrarse en la acera de un puente de Balsareny (cualquier mantenimiento del firme del puente implicará su desaparición) se optó por hacer también la medida de un punto que en un futuro se podría utilizar como base. Se trata del vértice geodésico "Pinasses". Los tiempos de medición de los puntos indicados fueron los siguientes:

Puntos	Inicio medida	Fin medida	Tiempo medida (min.)
Base S (a PUENTE) (2 m)	10:08	14:10	4h 2min
Base V (a TORRE) (2 m)	10:13	14:13	4h
Rover V (a Vilaforns)(0,178 m)	10:02	12:17	2h 15min
Rover V (a Pinasses)(0,170m)	12:43	14:20	1h 37min
Rover S (a Sallent) (0,172m)	9:55	14:45	4h 50min

Tabla 1

El resultado de las coordenadas de las bases, que se utilizaron para el cálculo de los puntos hasta el día 28-4-08, que es cuando volvimos a recalcular las bases fue el siguiente:

ED50	X	Y	H (ortométrica)
Base S	408341,152	4630118,425	274,317
Base V	406671,444	4632562,272	299,792
ETRS89	X	Y	h (elipsoidica)
Base S	408247,220	4629914,276	324,190
Base V	406577,528	4632358,140	349,711

Tabla 2

28 de abril de 2008

Como no se conocía exactamente el grado de intensidad de subsidencia en la zona de las bases, se optó por hacer una nueva medida de las bases el día 28 de abril de 2008. Se operó de forma análoga a la realizada el día 12 de marzo, obteniéndose las siguientes coordenadas:

ED50	X	Y	Z (ortométrica)
Base S	408341,151	4630118,425	274,322
Base V	406671,441	4632562,274	299,786
ETRS89	X	Y	Z (elipsoidica)
Base S	408247,219	4629914,278	324,196
Base V	406577,526	4632358,143	349,705

Tabla 3

Estas coordenadas de las bases se utilizaron por la medida de todos los puntos desde el 28 de abril hasta finales del mes de julio.

19 de septiembre de 2008

El día 19 de septiembre de 2008, se efectuó una nueva medición de las bases, antes de reanudar las medidas de más puntos de control después de las vacaciones de verano. Las nuevas coordenadas calculadas fueron las siguientes:

ED50	X	Y	Z (ortométrica)
Base S	408341,145	4630118,426	274,309
Base V	406671,432	4632562,276	299,776
ETRS89	X	Y	Z (elipsoidica)
Base S	408247,212	4629914,279	324,183
Base V	406577,517	4632358,145	349,695

Tabla 4

5. Comprobación de la fiabilidad de la metodología utilizada

Con el fin de comprobar que la metodología utilizada daba la precisión requerida se procedió a comprobar una serie de puntos mediante topografía clásica. De esta manera, se realizó una nivelación trigonométrica de los puntos (Cal7, Torre, 229A, 229B, 97 y 104), partiendo del punto PUENTE. Se utilizó el método del puntúo medio, no efectuando visuales más largas de 90 metros y haciendo las medidas mediante la regla de Bessel, la cual se aplicó 2 veces por cada visual. Además, se realizaron 3 anillos cerrados, con lo cual se pudo conocer el error altimétrico de cierre en cada uno de los 3 anillos. Los errores y datos básicos de los 3 anillos efectuados se pueden observar en la siguiente tabla:

Anillo	Nº Estaciones	Longitud	Error de cierre	Itinerario Puntos
1	6	864m	-0,0049m	Puente-1-2-Cal7-3-4-Puente
2	6	857m	-0,0070m	Cal7-5-6-Torre-7-8-Cal7
3	7	995m	-0,0027m	Torre-229B-229A-9-97-10-104-Torre

Tabla 5

El aparato topográfico utilizado para hacer las mediciones topográficas clásicas fue una estación total Leyca con una precisión angular de 10^s y lineal de ±3mm±3ppm. En la tabla 6 se indican las altitudes ortométricas medidas con el sistema GPS y con el sistema de nivelación trigonométrica. Se puede observar como ningún de los puntos medidos en la nivelación supera los ±2cm de diferencia. Eso nos sirvió para comprobar que las medidas con GPS nos daban la precisión buscada, pues las diferencias estaban siempre por debajo de la tolerancia fijada de ±2cm.

PUNTO	Z (GPS)	Z (Estación total)	Diferencia
Cal7	303,012	303,010	0,002
Torre	325,300	325,289	0,011
229A	319,646	319,648	-0,002
229B	323,335	323,328	0,007
97	309,125	309,110	0,015
104	327,065	327,054	0,011

Tabla 6

6. Control de calidad

Las altitudes de los puntos medidos tenían que tener la precisión exigida $\pm 2\text{cm}$. En caso de que no la tuvieran debido a diferentes motivos como quizás una cobertura y geometría desfavorable de satélites, una situación del punto en zonas de baja cobertura debido a la presencia de árboles, taludes, etc. se repitieron hasta que dieron un error inferior a $\pm 2\text{cm}$. Se repitieron un total de 43 puntos diferentes. Alguno de ellos fueron medidos hasta 4 veces. Este control de calidad se realizó a través del software "Topcon Tools" con el cual hicimos el cálculo en postproceso de todas las bases y puntos de control. En una de sus opciones se puede fijar un nivel máximo de error en diferentes parámetros que se está dispuesto a tolerar en el cálculo de los puntos por mínimos cuadrados. Se fijó en todos los puntos un error máximo de 2cm. En la figura 1 puede observarse la pantalla donde se fijaba la tolerancia de 2cm en distintos parámetros.

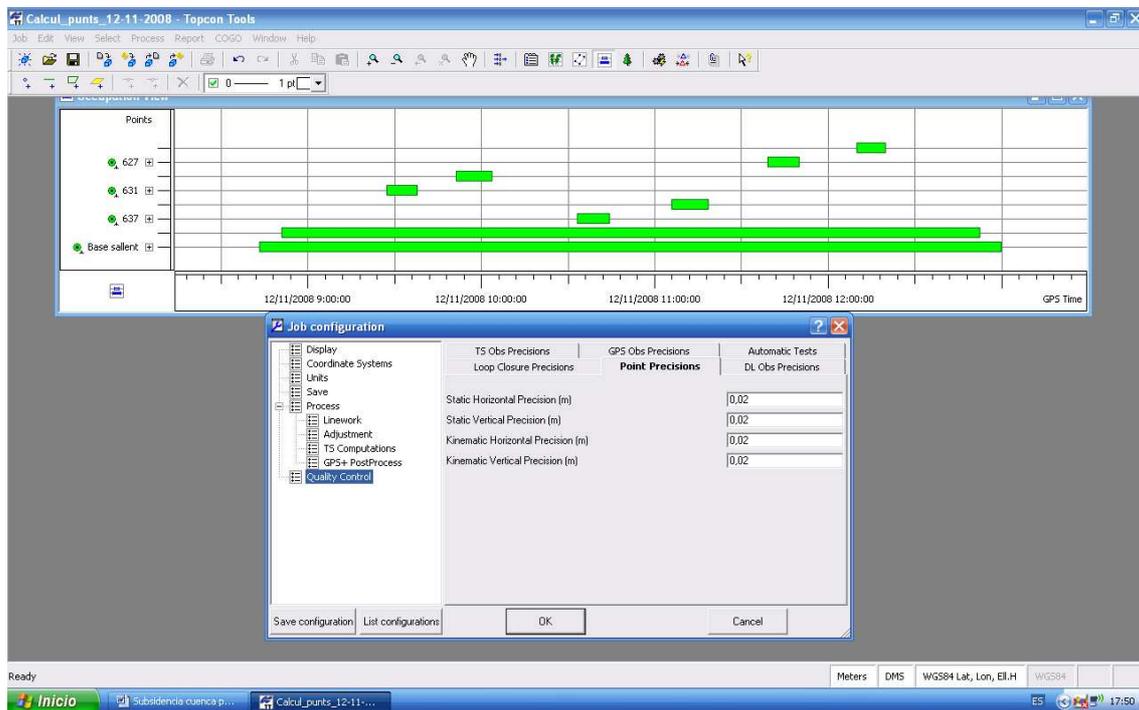


Figura 1

7. Mediciones de puntos de control

A partir de las mediciones efectuadas se elaboró una ficha de cada punto en la que venían indicadas las coordenadas cartográficas UTM en los dos sistemas geodésicos de referencia (ED50 y ETRS89), la altitud ortométrica y altitud elipsoidica y una foto de la situación del punto. Para los puntos que disponían de mediciones anteriores, se pudo elaborar un gráfico de variaciones de altitudes. Se disponía de 71 puntos con mediciones efectuadas el año 1990, 127 puntos con mediciones de las campañas de los años 1995 y 2003. Los 127 puntos del año 1995 no son iguales a los del año 1990, pero si a los del año 2003. Por tanto, sólo hemos podido calcular variaciones en los puntos indicados, con respecto al año 2008, y entre los años 2003 y 1995. Cabe indicar que los puntos ya existentes se han conservado con su denominación original, pero los puntos que no fueron hallados, se han denominado con el mismo código pero añadiendo al mismo la letra C detrás. Con respecto a la red de puntos situados en la zona de terreno nueva han sido un total de 40 puntos que se han numerado a partir del número 600.

A partir de los puntos que disponían de mediciones en años anteriores (1990, 1995 o 2003) se elaboraron a través del software TCP-MDT planos de isolinéas de hundimiento. Concretamente, se elaboraron los planos siguientes: Plano de isolinéas de hundimiento 2008-1990 y 2008-1995. A partir del ArcGis 9.2 se elaboraron 2 planos TIN de hundimientos, en la que cada coloración indica un determinado rango de hundimiento. (Ver planos 1 y 2).

También, para los 127 puntos con mediciones en los años 1995, 2003 y 2008 se ha calculado la velocidad de hundimiento para los periodos 2003-1995 y 2008-2003. En la tabla 7 vienen indicados los desplazamientos verticales y velocidades de 36 puntos de los 127 puntos con mediciones en los años 1995, 2003 y 2008. En la figura 2 se indican gráficamente las velocidades de hundimiento para 3 de los puntos (390, 399 y 447) afectados por una mayor subsidencia.

8. Conclusiones

Observando el plano 1 se puede ver que hay zonas del terreno que han experimentado unas elevaciones de entre 0 i 40cm, entre los años 2008 y 1990. Al respecto cabe indicar que técnicos de la empresa Iberpotash han manifestado que es un fenómeno que se había detectado en campañas de mediciones muy anteriores a las indicadas en este estudio, así como en otras zonas mineras potásicas como la de Súrria y Cardona. Por lo tanto, hay precedentes en la minería de sales potásicas.

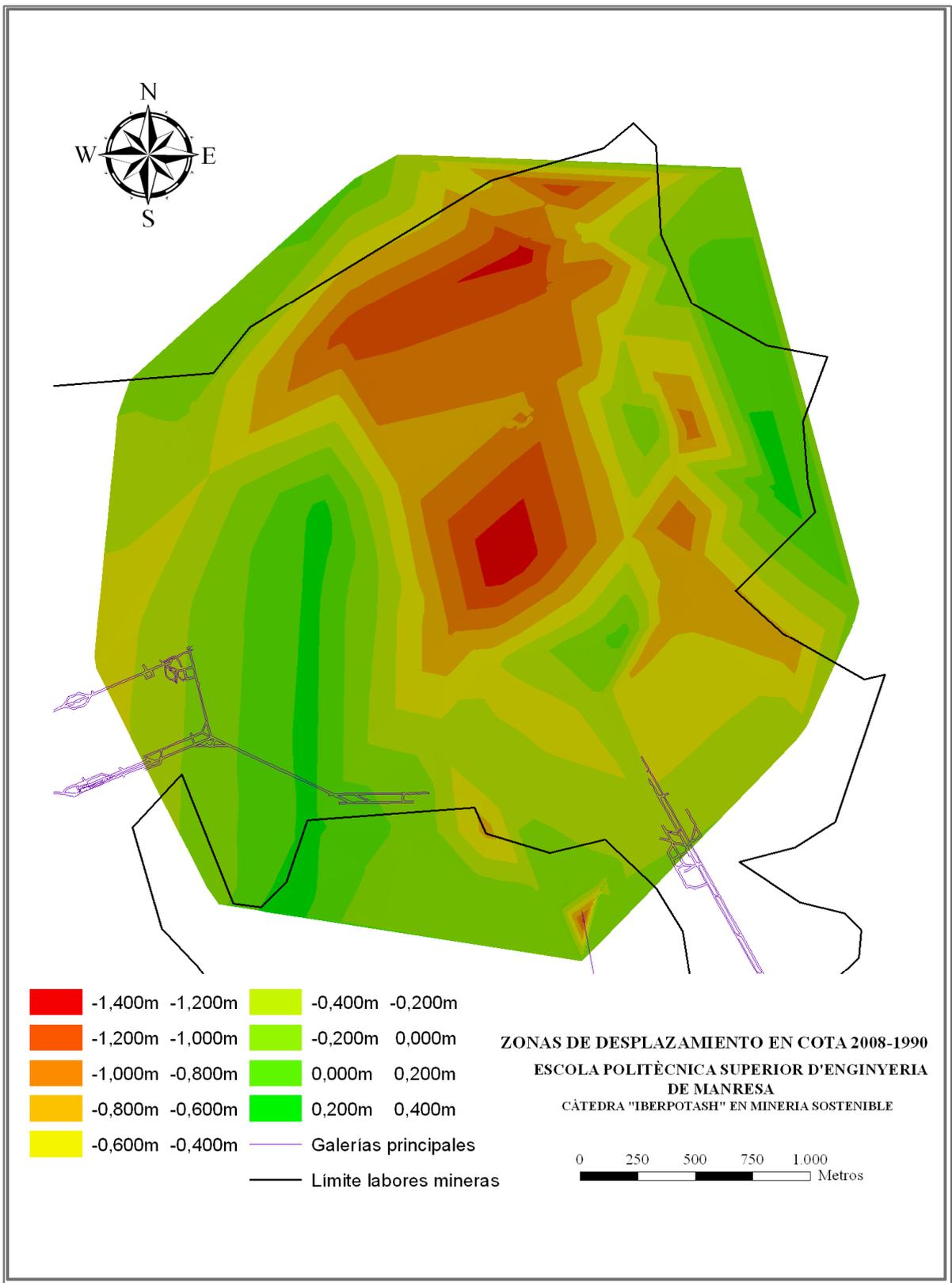
De los 127 puntos con mediciones en los años 1995, 2003 y 2008, se ha detectado un aumento de la velocidad de desplazamiento vertical para el periodo 2008-2003, respecto al periodo 2003-1995; en 60 puntos. Ello representa un 47'2% de los puntos de control medidos en estos años. Una explicación está en que el ámbito geográfico abarcado por la malla de los 127 puntos de control corresponde a zonas de la mina muy activas desde el punto de vista extractivo. Sin embargo, será muy importante, en futuras mediciones controlar el comportamiento de la subsidencia en los puntos de control de esta zona.

Indicar también, que la metodología utilizada mediante sistema GPS estático diferencial en postproceso, con dos bases de medición simultáneas, y con un tiempo de medición de las estaciones móviles de cómo mínimo 10 minutos; ha resultado muy apta para la precisión requerida en el presente estudio.

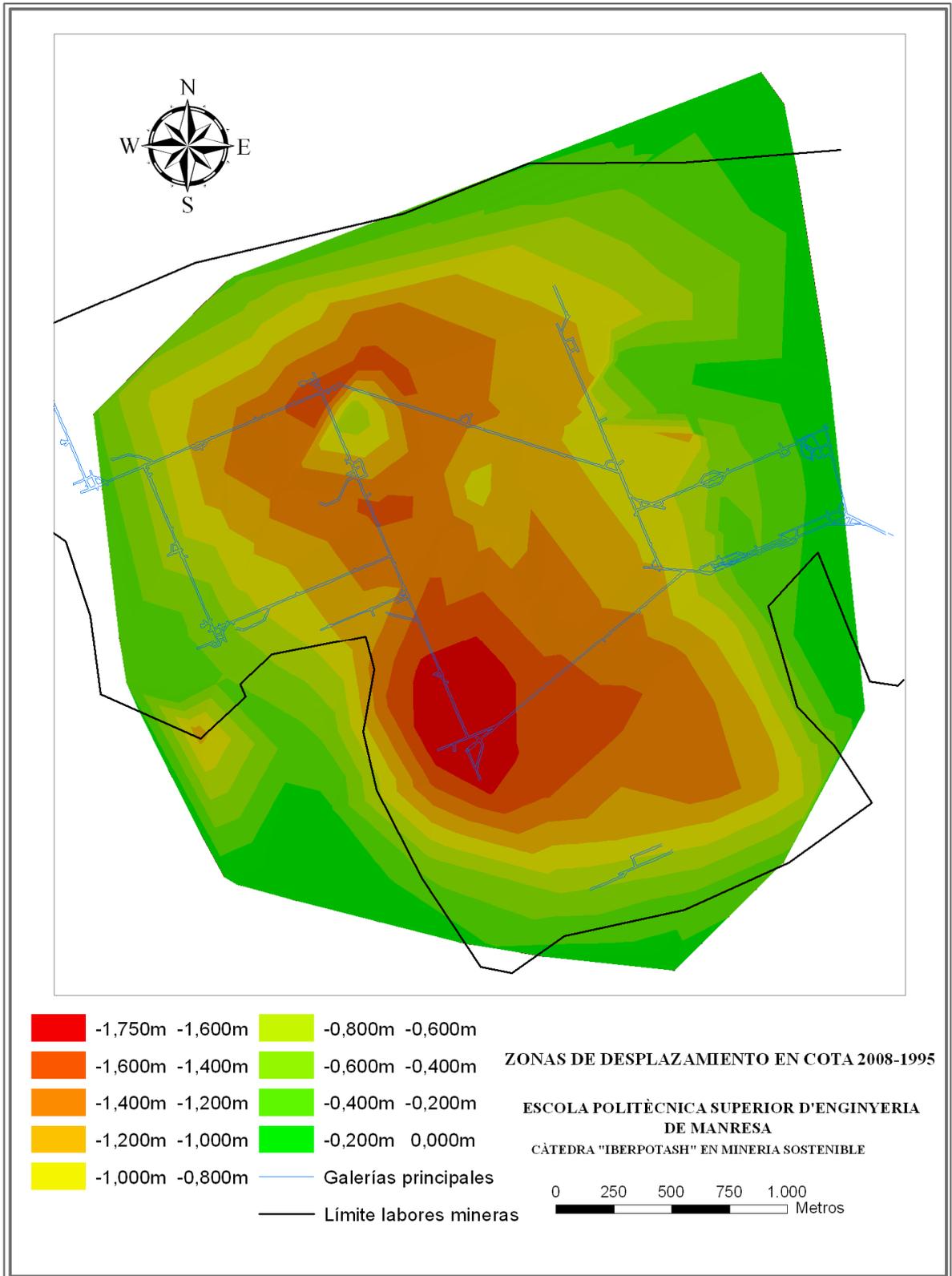
Finalmente cabe destacar que la empresa Iberpotash, SA, ha potenciado en los últimos años políticas de sostenibilidad dirigidas a poder compatibilizar de una forma adecuada la actividad minera con el Medio Ambiente. Fruto de estas políticas está la intensificación de campañas de mediciones topográficas de las posibles zonas de influencia de las labores mineras subterráneas en la superficie. Un buen conocimiento de la subsidencia producida por la actividad minera permitirá poder llevar a cabo actuaciones de mejora de la propia actividad minera, así como de la planificación territorial. Es por ello, que la voluntad de la empresa es continuar llevando a cabo estas mediciones con una periodicidad bianual en las zonas de influencia de las 2 minas que la empresa tiene en Sallent-Vilafruns y Surria.

9. Bibliografía

- ESTRUCH SERRA, Miquel; TAPIA GÓMEZ, Anna. Topografía Subterránea para minería y obras. Ediciones UPC, Barcelona, 2003.
- KARMIS, M.; AGIOUTANTIS,Z.; JAROSZ A. Subsidence predictions techniques in u.s.a.: state of the art Review. Min. Res. End., v. 3, No. 3, pp 197-210. 1990. USA.
- RAMIREZ OYANGUREN, P.; RAMBAUD PÉREZ, C. ET AL. Hundimientos mineros. Métodos de cálculo. Instituto Tecnológico Geominero de España. 1986. Madrid.
- STEED, C.; BAWDEN, W.F.; COODE, A.M.; MOTTAHED, P. Subsidence prediction for saskatchewan potash mines. Proc. U.S. Symp. on Rock Mechanics, 26th . 1985. USA. pp 163-170.
- DOMÍNGUEZ GARCÍA-TEJERO, Francisco; *Topografía General y Aplicada*. Dossat, S.A., Madrid, 1984.
- Real Decreto 1071/2007, de 27 de julio, por el que se regula el sistema geodésico de referencia oficial en España. BOE. Boletín Oficial del Estado, 29 Agosto 2007 (núm. 207)



Plano 1

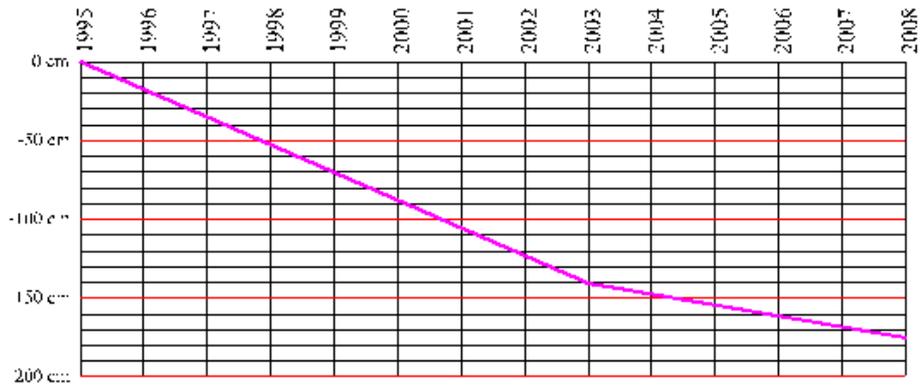


Plano 2

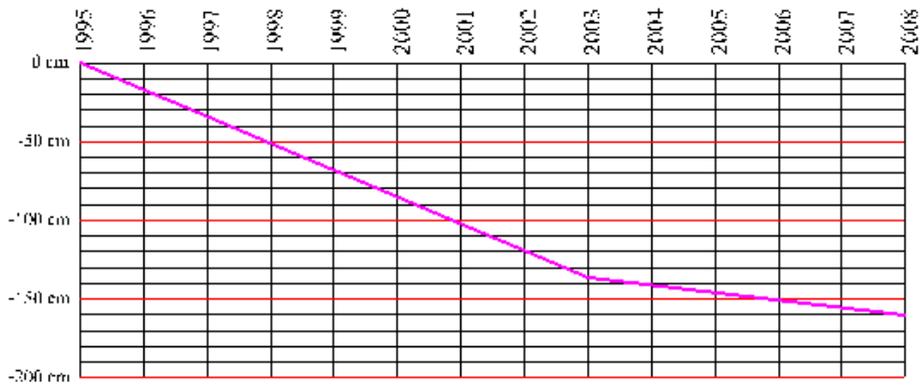
PUNT	Desplazamiento vertical 2003-1995	Desplazamiento vertical 2008-2003	Velocidad (cm/año) 2003-1995	Velocidad (cm/año) 2008-2003
447	-0,526	-0,938	-6,578	-18,755
440	-0,656	-0,365	-8,200	-7,300
436	-0,408	-1,049	-5,100	-20,980
193	-0,581	-0,351	-7,263	-7,020
416	-0,457	-0,254	-5,715	-5,076
429	-0,680	-0,581	-8,502	-11,617
430	-0,303	-1,021	-3,787	-20,420
424	-0,683	-0,560	-8,541	-11,194
425	-0,658	-0,642	-8,219	-12,850
464	-0,102	-0,064	-1,271	-1,280
380	-1,038	-0,239	-12,979	-4,774
431	-0,099	-0,572	-1,237	-11,440
187	-0,168	-0,138	-2,100	-2,760
381	-0,292	-0,062	-3,650	-1,240
378	-0,888	-0,226	-11,097	-4,524
426	-0,481	-0,934	-6,011	-18,682
370	-0,839	-0,181	-10,481	-3,630
372	-0,711	-0,211	-8,888	-4,220
470	0,033	-0,019	0,413	-0,380
462	-1,242	-0,249	-15,525	-4,980
469	0,048	-0,026	0,605	-0,526
461	-1,456	-0,275	-18,200	-5,499
444	-0,083	-1,293	-1,034	-25,865
346	-1,138	-0,218	-14,227	-4,356
399	-1,365	-0,245	-17,066	-4,894
450	-0,019	-1,192	-0,240	-23,837
466	-0,329	-0,143	-4,113	-2,860
442	-0,237	-1,231	-2,963	-24,620
443	-0,130	-1,295	-1,626	-25,898
395	-0,412	-0,143	-5,145	-2,860
398	-1,118	-0,350	-13,978	-6,996
393	-1,219	-0,220	-15,235	-4,404
392	-1,283	-0,374	-16,033	-7,488
340	-1,134	-0,216	-14,169	-4,330
390	-1,421	-0,355	-17,757	-7,109
391	-1,176	-0,394	-14,696	-7,886

Tabla 7

GRÁFICA DE HUNDIMIENTO DEL PUNTO 390: AÑOS 1995-2003-2008



GRÁFICA DE HUNDIMIENTO DEL PUNTO 399: AÑOS 1995-2003-2008



GRÁFICA DE HUNDIMIENTO DEL PUNTO 447: AÑOS 1995-2003-2008

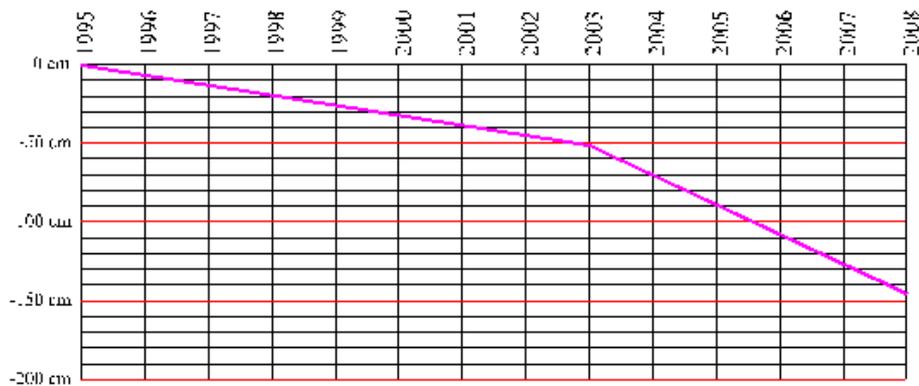


Figura 2