



# 17 *Monitoreo de Estructuras” aplicado a al control geotécnico de los “open pit” en las explotaciones Mineras a cielo abierto.*

*Agrim. Carlos Alberto Giobellina*



Profesor Adjunto en la asignatura Mediciones Especiales.

Tesis de la “Maestría Interdisciplinaria en Gestión Ambiental” - Curso de posgrado: “Introducción a los Sistemas de Información Geográficos” –

Estuvo como profesional a cargo, del equipo de Actualización de parcelas rurales para la D.G.C. de Tucumán

Consultor y inspector para empresas del país, en Catastro, Cartografía y GIS.

Desde hace 4 años, es contratado por el INAI, para el programa ReTeCi.

*Ing.Geod.Geof. Jorge Marcelo Durand*

Trabajos de topografía en la Dirección de Recursos Energéticos y de Minería.

En la Dirección de Recursos Hídricos y en la Dirección General de Catastro.

Control de nodales de nivelación mediante nivelación geométrica y comparación con nivelación satelital GPS.

Ayudante estudiantil en la cátedra Geodesia y Astronomía de Posición.

Auxiliar Docente Graduado en la Cátedra Tecnología Satelital y Geodinámica.





**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEODESIA Y TOPOGRAFÍA**  
**ESCUELA DE AGRIMENSURA**  
**CÁTEDRA DE MEDICIONES ESPECIALES**

**Docentes:**

**Ing. Geod. y Geof. Raúl Herrero**  
**Agrim. Carlos Giobellina**  
**Ing. Geod. y Geof. Marcelo Durand**

**TRABAJO DEL ALUMNO LEANDRO GIOBELLINA**

**Actual sistema de monitoreo en el “*Open Pit*” de Bajo de la Alumbraera, explotación que ejecuta la “UTE - Minera Alumbraera Ltd. – Yacimientos Mineros Agua de Dionisio (YMAD)”**



Figura 1 - Vista satelital del “Open Pit” en el Bajo de La Alumbraera.

## I. RESUMEN

En una explotación minera a cielo abierto, así como en otro tipo de obras como ser edificios, estructuras, diques, etc., es necesario realizar controles de movimientos y deformaciones de sus elementos por distintos motivos, y el tipo de control (precisiones, frecuencias, parámetros a medir) depende de la naturaleza del elemento a medir y las características del proyecto. En el presente trabajo presentaremos la situación del yacimiento minero Bajo de La Alumbraera y de como el avance tecnológico acompañó su desarrollo cambiando los métodos de trabajo; lo que en un principio se realizaba con mediciones clásica, evolucionó y hoy se realiza con un sistema de control y de monitoreo automático.

## II. INTRODUCCIÓN: MINERÍA A CIELO ABIERTO

La minería sobre superficie crea a menudo límites en la excavación con taludes más empinados que los creados bajo procesos naturales en el mismo tipo de roca. En estas condiciones es probable que se permita cierto grado de inestabilidad. Los riesgos asociados con esta inestabilidad de taludes pueden ser extremadamente variables en carácter; desde pequeñas rocas cayendo de los bancos de la mina hasta una falla masiva en toda la pared de la mina. *Existen evidencias de que los pequeños movimientos precursoros de un talud se producen durante un largo periodo antes de que el talud colapse (Hoek and Bray, 1981).* La evaluación de los riesgos sobre inestabilidad de taludes se puede desarrollar por observación visual de los signos precursoros tales como grietas y pequeños movimiento. Un indicador más fiable sobre inestabilidad implica la medición cuantitativa de movimientos externos y aceleración de material como un desarrollo de mecanismos de inestabilidad.

Los primeros sistemas de monitoreo consistían en realidad en procesos de auscultación topográfica clásica, requerían mucho tiempo y se obtenían resultados poco satisfactorios en el sentido que no era sencillo determinar o predecir con certeza el comportamiento de los taludes. Comparando los tiempos de medición con la dinámica de modificación de la topografía en una mina a cielo abierto el método es poco eficiente. Las mediciones servían como indicador de estabilidad de una zona pero no aportaban información suficiente para inferir en su comportamiento futuro. *El desarrollo de un sistema de monitoreo, adoptando criterios aceptables sobre deformación de taludes junto con un sistema de alarma y diseño de estabilización es hoy un método estándar para enfrentarse con inestabilidad de taludes.*

El proyecto de explotación cuprífera Bajo de la Alumbra se encuentra al noroeste de la provincia de Catamarca, Argentina, al este de la Cordillera de los Andes con una altura promedio de 2600 metros sobre el nivel del mar.

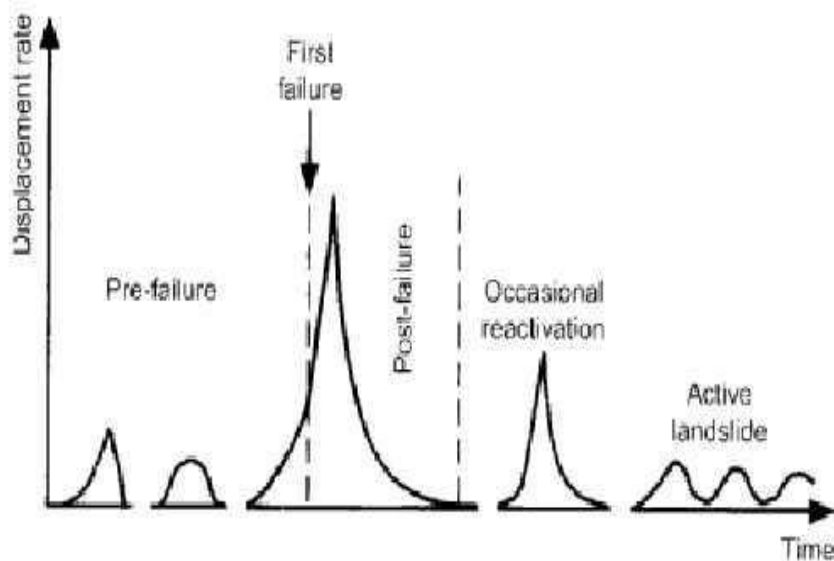
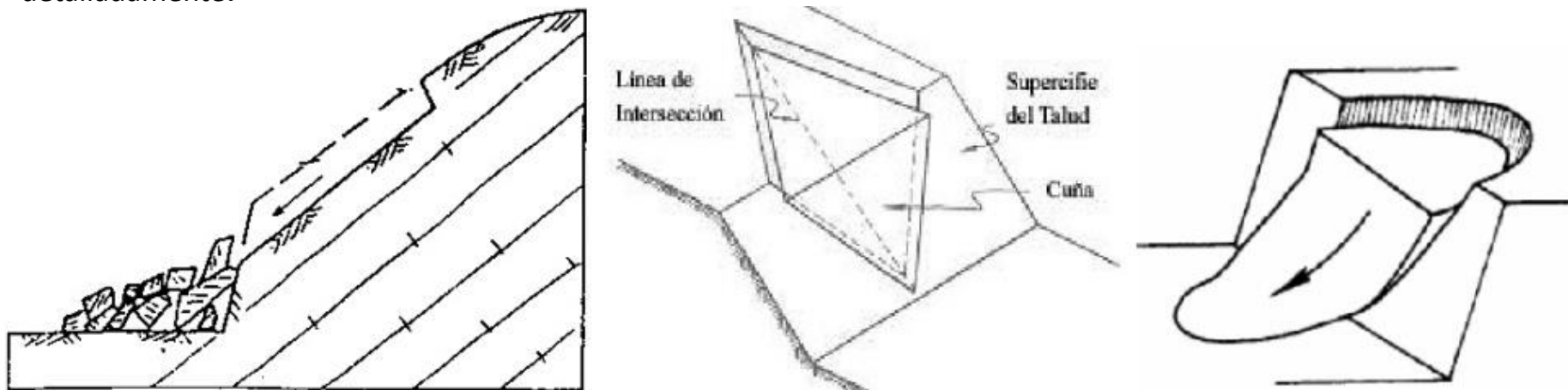
## II.1. TALUDES

Para poder avanzar en el trabajo primero definiremos talud como cualquier superficie inclinada respecto de la horizontal que hayan de adoptar permanentemente las estructuras de tierra o roca. No hay duda que el talud constituye una estructura compleja de analizar debido a que en su estudio coinciden los problemas de mecánica de suelos y de mecánica de rocas, sin olvidar el papel básico que la geología aplicada desempeña en la formulación de cualquier criterio aceptable. Cuando el talud se produce en forma natural, sin intervención humana, se denomina ladera. Cuando los taludes son hechos por el hombre se denominan cortes o taludes artificiales, según sea la génesis de su formación; en el corte, se realiza una excavación en una formación térrea natural (desmontes), en tanto que los taludes artificiales son los lados inclinados de los terraplenes.

En ciertos trabajos de la Ingeniería es necesario utilizar el suelo en forma de talud como parte de la obra. Tal es el caso de terraplenes en caminos viales, en presas, canales, etc.; donde se requiere estudiar la estabilidad del talud. En ciertos casos la estabilidad juega un papel muy importante en la obra, condicionando la existencia de la misma, donde un mal diseño puede hacer fracasar la obra.

Se define como falla de talud, diferente de falla geológica, como deslizamiento, colapso de toda índole o movimiento excesivo, al grado de ser incompatible con la concepción ingenieril del comportamiento del talud y con la función para la que fue construido.

Los taludes de roca pueden presentar tres tipos principales de rotura o falla: planar, por cuñas y circular. En el presente trabajo, el tipo de rotura plana será utilizada en el cálculo de desplazamientos, por lo que se describirá detalladamente.



Antes de una falla, por lo general se aprecian indicios que son los precursores del evento. Pueden empezar por pequeñas grietas, pequeños movimientos en el orden de los centímetros y algunos pueden ser varios metros. Desplazamientos, inicialmente muy lentos, que se aceleran progresivamente y que preceden a la rotura del talud. Estos movimientos son los que se deben detectar a tiempo y controlarlos para poder inferir en el comportamiento del talud.

## II.2. MINERÍA A CIELO ABIERTO

Una explotación minera a cielo abierto (tajo abierto, rajo abierto, open pit) es una excavación a gran escala que tiene por objeto extraer el mineral de interés (carbón, hierro, cobre, oro, plata, etc.). Para llegar al mineral, por lo general, hay que extraer miles o millones de toneladas de roca sin valor. Todo este movimiento de material no es al azar sino que está planificado y diseñado en base a la disposición de los minerales, costos de extracción, factores de seguridad, etc. El diseño geométrico sigue un esquema de banqueo con taludes o paredes verticales y rampas intermedias que permiten el acceso a los equipos y se va realizando por etapas.

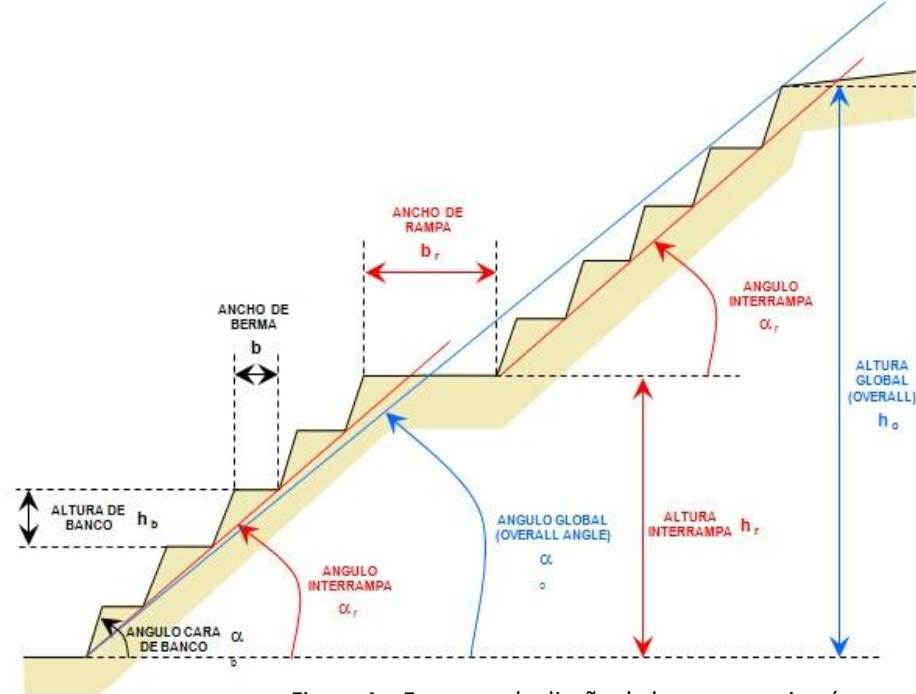


Figura 4 – Esquema de diseño de bancos en minería

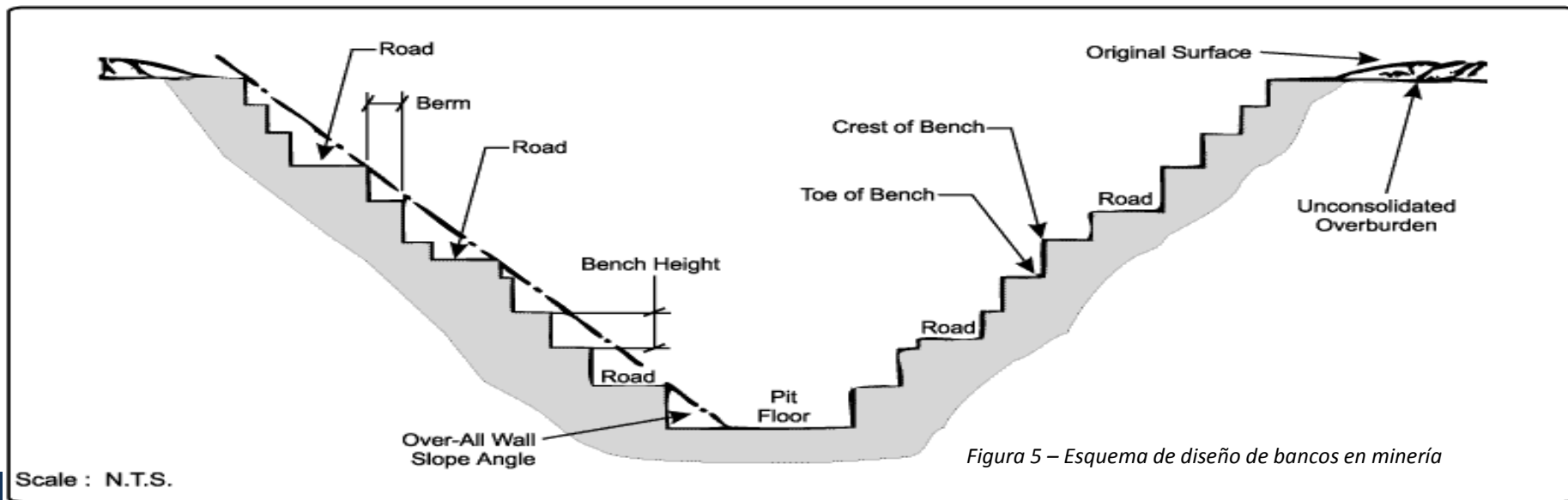


Figura 5 – Esquema de diseño de bancos en minería

Scale : N.T.S.

### III. CONTROL DE ESTABILIDAD Y DEFORMACIONES

#### III.1. Auscultación clásica

El objetivo de una auscultación es la determinación de los movimientos relativos de una serie de puntos ubicados en una estructura dada, para distintos estadios de cargas estáticas y que acontecen en diferentes momentos.

*La Auscultación comprende un conjunto de instrumentos adecuados de medición, metodologías de trabajos, series de observaciones y por último la interpretación de los datos.* En general se estudian los movimientos horizontales por separado de los verticales. Dependiendo del elemento a auscultar (presa hidráulica, edificio, talud, etc.), el rango de la precisiones requeridas varía en función del elemento a auscultar y sus. En el caso de una presa hidráulica, se requiere alcanzar precisiones del orden de los milímetros, mientras que para la auscultación de taludes puede bastar con precisiones sub centimétricas.

Requiere del diseño y selección de instrumental a usar, métodos de observaciones y procesos de cálculos y ajustes, que garanticen lograr las precisiones establecidas a priori; para que las magnitudes (distancias, velocidades) del conjunto de elementos controlados surjan claramente de los datos procesados. Los valores de los residuales deben ser de un orden inferior al de las magnitudes que se pretenden determinar.

Para los procesos de cálculo, si se tiene redundancia de observaciones, se pueden realizar comprobaciones y compensaciones estableciendo valores estadísticos como el valor más probable, las matrices de varianza-covarianza, elipses de error, etc., que reflejan la tolerancia con la que se ha realizado las observaciones.

En una red de Auscultación (tanto planimétrica como altimétrica), se pueden distinguir tres elementos y separarlos en grupos y todos de igual importancia. Los pilares donde se estacionan los equipos o Puntos de Red, los objetivos o Puntos de Control de Deformación y la red de puntos que sirven para el control y ajuste de la red de pilares llamados Puntos de Control de Red.



Para el diseño del esquema general, es decir la ubicación de cada uno de estos elementos dentro de la red de auscultación, es donde el proyectista debe considerar todo aquello que tendrá influencia en la calidad de las observaciones: número de pilares, proximidad a los puntos de control de deformación, ángulo de intersección entre visuales (fuerza de figura), inclinación de las mismas, ubicación de los puntos de control de red, cercanía de las visuales a superficies (refracción y refracción lateral), etc. Esta fase tiene tanta importancia que el diseño de la red total permite obtener las magnitudes esperadas a priori. En muchas ocasiones no es sencillo diseñar la red óptima ya que, aunque exista en la teoría, no se puede construir en la práctica por cuestiones topográficas o en el caso del presente trabajo se suman las cuestiones operativas normales del avance de una explotación minera de esta naturaleza.



Figura 6 – Pilar de Auscultación  
Dique Cabra Corral – Salta -  
Argentina

### III.2. Metodología clásica

La metodología de la auscultación separa por cuestiones prácticas planimetría y altimetría. La auscultación planimétrica clásica se basa en micro triangulaciones y trilateraciones, o combinación de ambos métodos, para determinar desplazamientos resolviendo triángulos mediante el método de intersección adelante.

Para determinar los desplazamientos horizontales de los puntos de control de deformación, que es la incertidumbre principal, primero se debe asegurar que toda la red de pilares de observación sea confiable. La Red es ajustada previamente a la observación de los Puntos de Deformación. Este ajuste se realiza resolviendo la red, apoyándose en los puntos de control que están ubicados en zonas fuera del área de afectación de la obra ingenieril. Por ejemplo, en el caso de la auscultación del muro de un dique, los puntos de control de red deben estar fuera de los macizos rocosos en los que está anclado el muro principal ya que dichos macizos son afectados por los diferentes niveles de embalse.

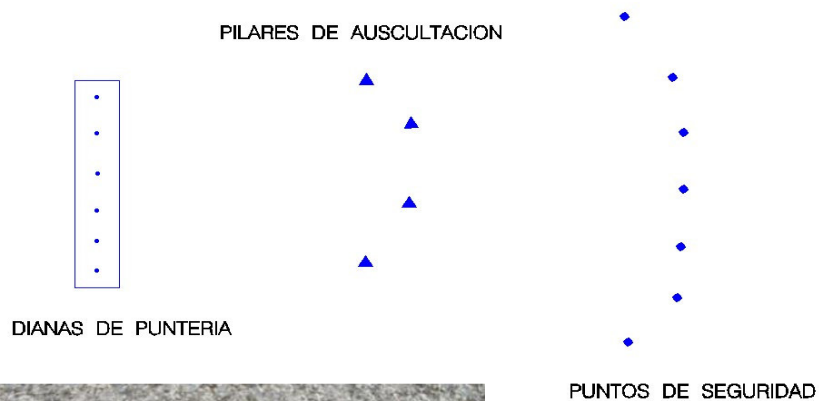
Una vez resuelta y ajustada la red de pilares de observación, se observan los Puntos de Control de Deformación. Dependiendo del instrumento se observaban solo ángulos horizontales o ángulos y distancias. Es necesario la redundancia de observaciones para resolver y ajustar por mínimos cuadrados la red de puntos, sumándole que las observaciones se repiten en series.



Figura 7 y 8 – Esquema de Auscultación de un Dique

Para el control altimétrico o control de hundimientos generalmente se utiliza nivelación geométrica de precisión. Siempre teniendo en cuenta las precisiones requeridas según el elemento auscultado y la magnitud de los movimientos que se pretenden determinar.

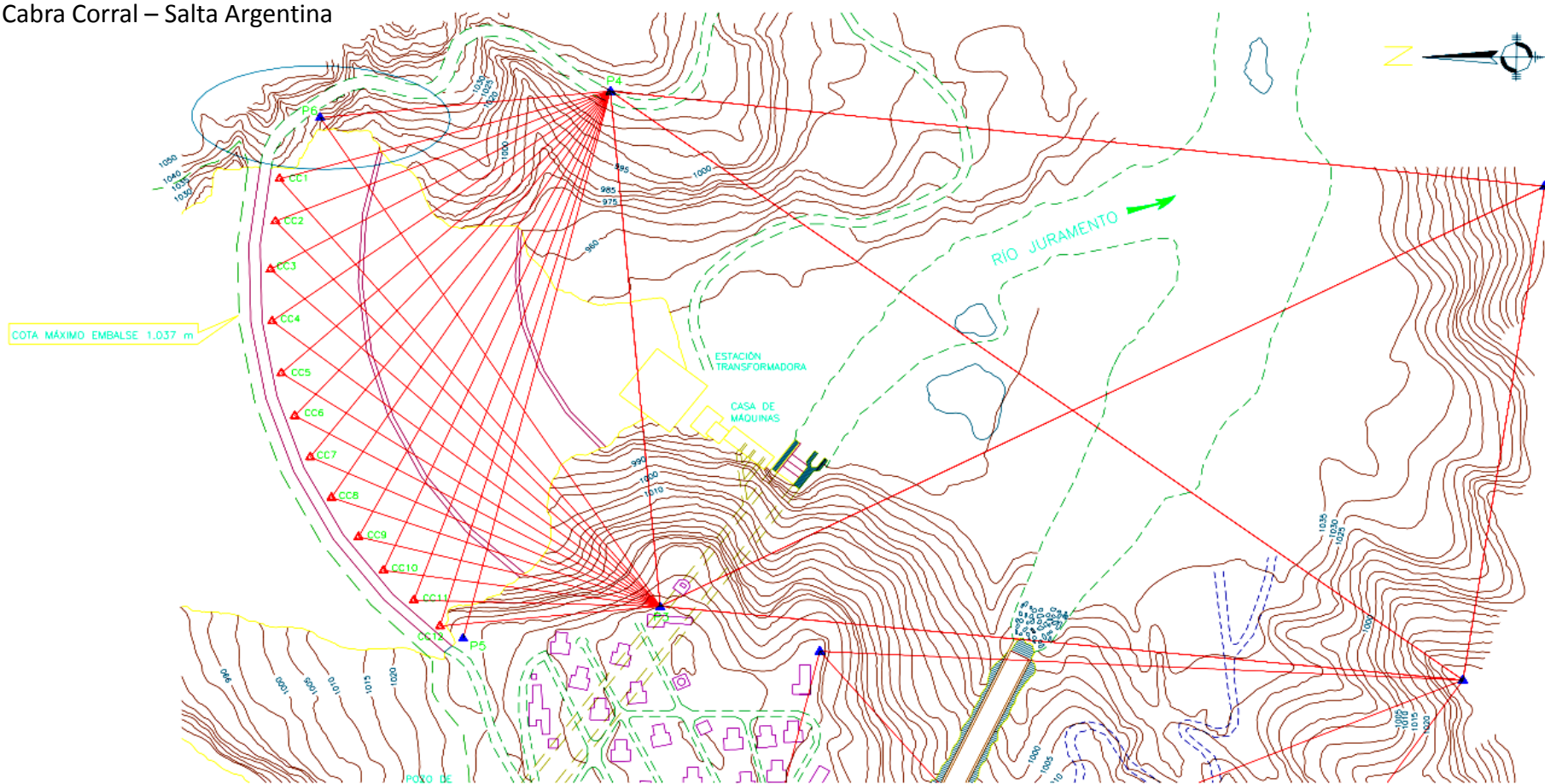
Todo método de medición óptico que se emplee se ve afectado por efectos de refracción; uno de los problemas más antiguos de la geodesia. Los métodos electromagnéticos también sufren efectos por las variaciones de condiciones atmosféricas. Por estas razones, como metodología rigurosa de medición, se busca siempre realizar las observaciones en las mismas condiciones atmosféricas para que las observaciones sean afectadas en la misma medida. Esto, por ejemplo, se puede lograr midiendo en horarios de la mañana temprano (poco después de la salida del sol), en las últimas horas de la tarde o de noche (con el auxilio de iluminación artificial), tiempo en que las condiciones atmosféricas tienden a ser homogéneas.



Dianas de Punterías de un Dique

Esto ayuda a que las líneas de visuales y las ondas electromagnéticas atraviesen un medio más uniforme sufriendo menos cambios por la variación de densidad y humedad del aire. Parte del método también es evitar en lo posible visuales rasantes a objetos (suelo, pared, etc) que por su diferencia de temperatura con el ambiente genera un cambio del medio en sus inmediaciones.

Figura – Esquema de Auscultación Dique  
Cabra Corral – Salta Argentina



### III.2.1. Método empleado en alumbraera previo al sistema de monitoreo

Antes del sistema automático de monitoreo, se usaba sistema de topografía convencional con Estación Total (ET) marca Geodimeter. El método consistía en bisectar prismas ubicados en las paredes del PIT desde dos pilares de estación ubicados a norte y sur del mismo. Los pilares de estación estaban convenientemente monumentados con una estructura de acero interna y cuerpo de hormigón con bases sobredimensionadas para garantizar su solidaridad con el macizo rocoso evitando así movimientos ajenos a este.

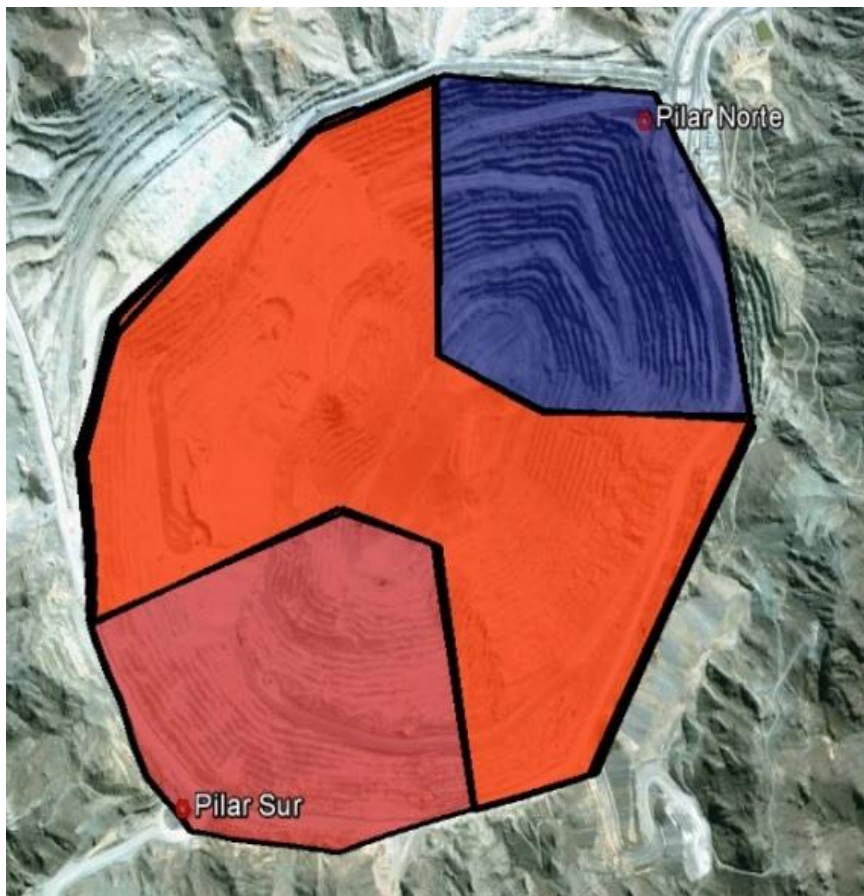


Figura 8 –Ubicación de pilares de Auscultación – Minera Alumbraera

Había aproximadamente 120 prismas (cada uno con su nomenclatura de identidad) convenientemente ubicados en los bancos del *Pit* según las necesidades planteadas por el área de Geología y Geotecnia, algunos de los cuales fueron recuperados para cuando se instaló el sistema automático. Por la forma del PIT y las limitaciones geométricas que esto implica, del total de los prismas aproximadamente la mitad de los prismas podían ser observados desde ambos pilares y el resto se observaban solamente desde uno de ellos.

Las mediciones las realizaban por el departamento de Topografía una vez por semana desde las 2 estaciones hacia todos los prismas. Esto implicaba el trabajo de 2 topógrafos durante un periodo de 6 horas aproximadamente. Previamente se controlaba las coordenadas de los pilares de observación con GPS-RTK. Luego se procedía a estacionar el instrumento (ET), se orientaba con el pilar opuesto y se procedía con la medición de los prismas.

Toda esta información era revisada, filtrada y sistematizada por los topógrafos en gabinete y puesta a disposición del departamento de Geología y Geotecnia en formato de planilla Excel. En Geología los datos eran cargados en el software Acquire, que es un administrador de bases de datos específico y permite realizar el análisis de la información. Con todo esto ellos hacían sus estudios limitándose a un análisis estadístico de los cambios de coordenadas y en base a esto y los estudios geotécnicos podían dilucidar la situación de los bancos.



Figuras 9 y 10 – Pilares de Auscultación - Alumbraera

### III.2.2. Limitaciones y fuentes de errores

Si comparamos esta metodología empleada con el método clásico de auscultación veremos lo siguiente:

- A.** Se reduce todo el esquema de auscultación (red de pilares y red de puntos de control) a solo dos pilares que se controlaban por GPS-RTK antes de realizar las mediciones.
- B.** No se tiene en cuenta los efectos de la refracción en el sentido que se realizaban mediciones durante un periodo diurno largo y hasta terminar. Se obvia los horarios favorables y desfavorables. Esto resulta en que los primeros puntos medidos a horas de la mañana estaban afectados por refracción en cierta magnitud mientras que los puntos medidos al avanzar la jornada (con variaciones climáticas) se veían afectados de distinta manera variando gradualmente.
- C.** Las distancias de medición varían entre los 300 y 1200 metros.
- D.** Los prismas son difíciles de ubicar a simple vista lo que requiere un esfuerzo del operador lograr la bisección de cada punto. Este esfuerzo produce un agotamiento en el operador lo que se refleja en la calidad de las mediciones a medida que avanza la jornada. A veces se turnaban los operadores lo que implica un cambio de “ojo” y de criterio. Esto también afecta la serie de medición.
- E.** Al ser tantos puntos a medir se realizaba solo uno o dos mediciones de cada uno comparando con una planilla para descartar errores groseros pero sin ser la cantidad suficiente para un análisis estadístico de la serie. Solo los prismas que se podían observar de los dos pilares podían tener un control más riguroso.
- F.** Al realizarse los controles solo una vez por semana el seguimiento de los puntos es poco consistente para la predicción de comportamiento de un talud o banco, pero lo suficiente para detectar movimientos y definir sectores críticos. Esto se compensaba con inspecciones visuales y otras mediciones realizadas por personal de Geotecnia.

Ante este panorama y como se pierde la rigurosidad del método clásico se puede caer en la errónea conclusión de que es una tarea de poca importancia o tomada a la ligera. Hay que tener en cuenta que se trata de una operación minera que funciona 24 horas al día, 7 días a la semana y que el departamento de Topografía trabaja solo 12 horas al día ya que por las tareas que en él se realizan, por cuestiones de seguridad no se pueden realizar en horas de poca luz natural (es decir, no se trabaja de noche). A esto se le suma que la Operación Minera es un voraz devorador de información topográfica por la dinámica misma de los movimientos de suelo diario (en el orden de los miles de toneladas de roca), lo que significa que los dos operadores y los equipos implicados en el proceso de medición no van a estar disponibles para todas las otras actividades diarias que realiza el Departamento de Topografía.



#### IV. Sistemas de monitoreo automático

**IV.1. Definición:** Un sistema de monitoreo automático de auscultación o monitoreo de taludes u otras estructuras, está formado por un conjunto de técnicas y tecnologías aplicadas de diferentes ramas del conocimiento. En el caso que estamos analizando: topografía, geodesia y geotecnia o geomecánica.

Su función consiste en controlar asentamientos, hundimientos, desplazamientos y deformaciones o combinación de ellos, para que un técnico especializado (según el elemento observado) pueda inferir en el comportamiento del elemento y, si es posible, predecir comportamientos futuros. Todo esto se logra por medio de una serie de sensores de medición continua (ET robótica, equipos GNSS, extensómetros, geófonos, etc.) conectado a un sistema integrado de captura y almacenamiento de datos, requiriendo controles mínimos por parte del técnico, quien puede avocarse directamente al análisis e interpretación de los datos.

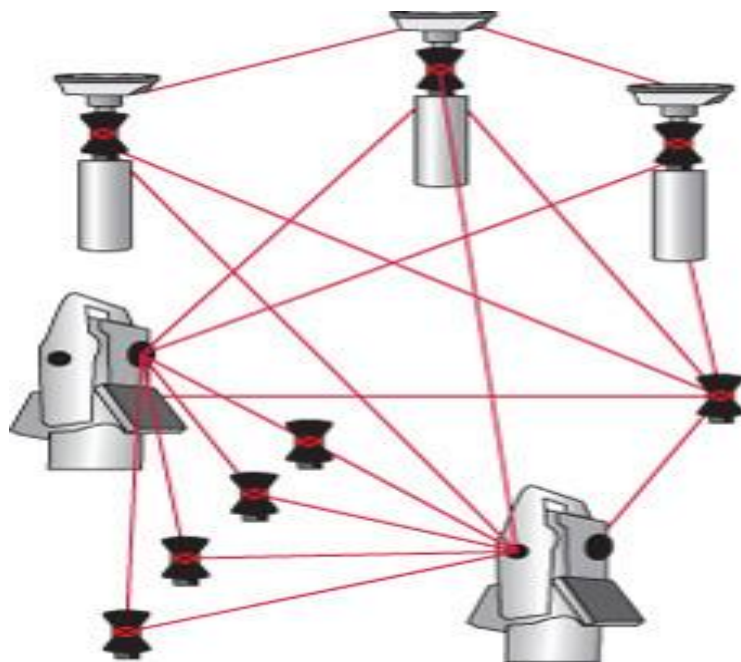


Figura 11 – Esquema de funcionamiento del sistema TPS + GNSS

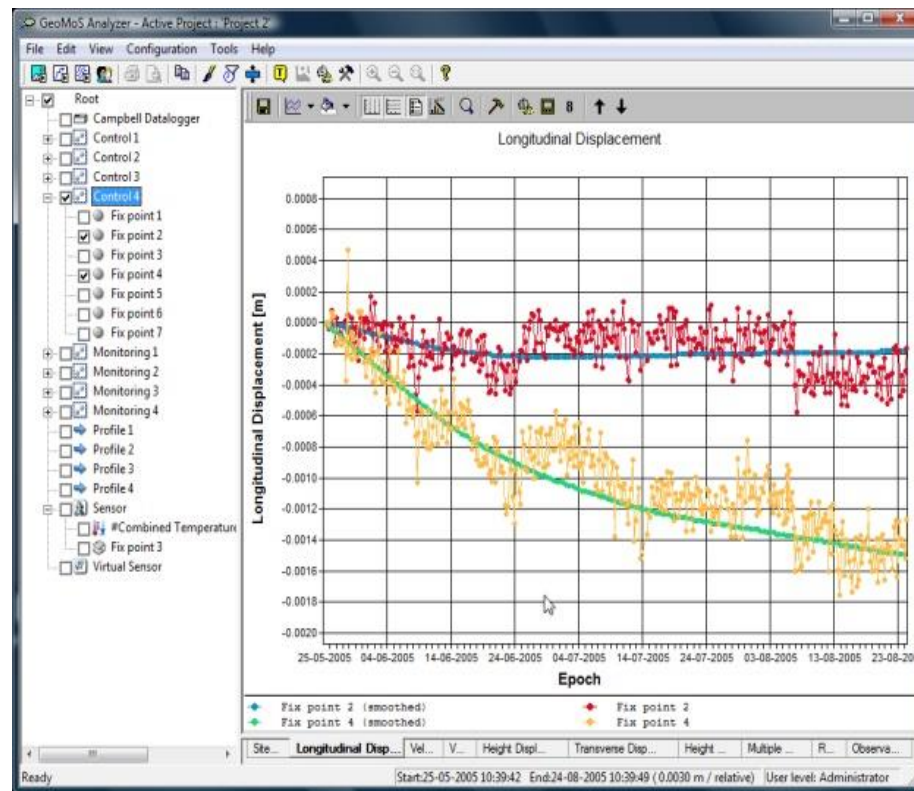
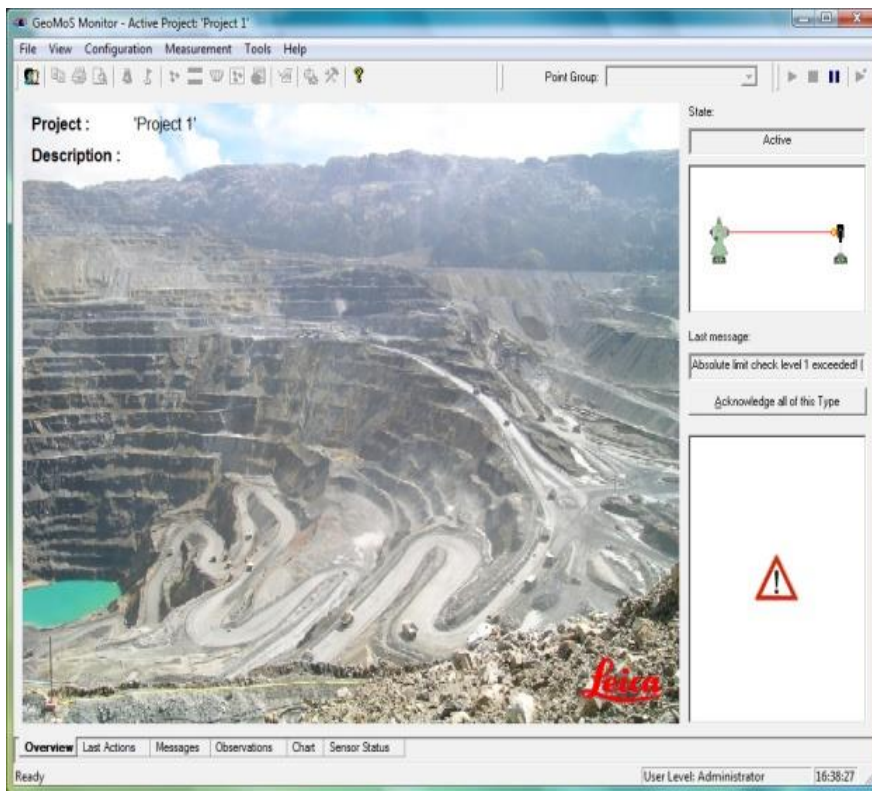
Este tipo de sistemas reduce tiempos y costos en el sentido que ya no es necesario operar cada uno de los instrumentos para la captura de datos. Solo deben realizarse los controles y ajustes necesarios para que el sistema funcione correctamente. Aparte de esto, al ser automatizado (es decir que no depende de la supervisión constante de un operador) puede operar 24 horas al día lo que aumenta significativamente el volumen de información capturada.

Existen en el mercado varios sistemas de monitoreo automáticos. El sistema que se encuentra operativo en alambra es el sistema Geomos de la firma Leica Geosystems.

## IV.2. Sistema GEOMOS LEICA

Este sistema GEOMOS brinda la posibilidad de conectarse a diferentes sensores como TPS, GPS, instrumentos geotécnicos y meteorológicos. Los instrumentos TPS son ET de la línea robótica con sistema de reconocimiento automático de prismas (ATR o PS) siendo muy flexible en las posibilidades de comunicación: cable, sistema bus, radio, LAN, WLAN, GSM/GPRS, UMTS y WiMax.

GEOMOS consta de dos partes principales o módulos: 1. Geomos Monitor es responsable de mantener los instrumentos, computar las mediciones, comprobar los resultados y emitir mensajes de alarma. 2. Geomos Analyzer es responsable de analizar los resultados grafica y numéricamente e imprimir o exportar la información. Las interfaces con el usuario son muy amigables y de fácil entendimiento.





### IV.3. Esquema de instalación del sistema en El Bajo de La Alumbraera

En sistema consta de cuatro estaciones TPS conectadas a un sistema GNSS+RTK (sistema GNSS con transmisión de corrección a tiempo real) que corrige las posición y orientación de cada estación pero solo 2 de las cuatro estaciones están instaladas para monitoreo de los bancos del PIT y a ellas nos referiremos. Esta corrección puede hacerse de dos maneras ya sea una antena GNSS en el punto estación y una en el punto orientación, o tres puntos orientación con antenas GNSS-RTK lo que me da la posibilidad de realiza lo que se conoce como “estación libre” o intersección inversa. En este caso cada estación tiene su antena GNSS-RTK.

Cada pilar donde se ubican las estaciones es robusto y está bien cimentado. Solidario a el está el soporte donde va montada la antena GNSS. Cada equipo está dentro de una caseta protectora con una gran ventana para que los instrumentos protegidos del clima o cualquier cosa que pueda afectar su funcionamiento. Cada caseta está provista de energía eléctrica, un sistema de comunicación inalámbrica, un sistema auxiliar de energía, instrumentos meteorológicos, una TPS, una antena GNSS-RTK y una computadora que comanda los instrumentos y transmite la información al un servidor central en la oficina de Geotecnia.



Sistema Integrado de Monitoreo con Mediciones Polares (TPS) y Satelitales (GPS)

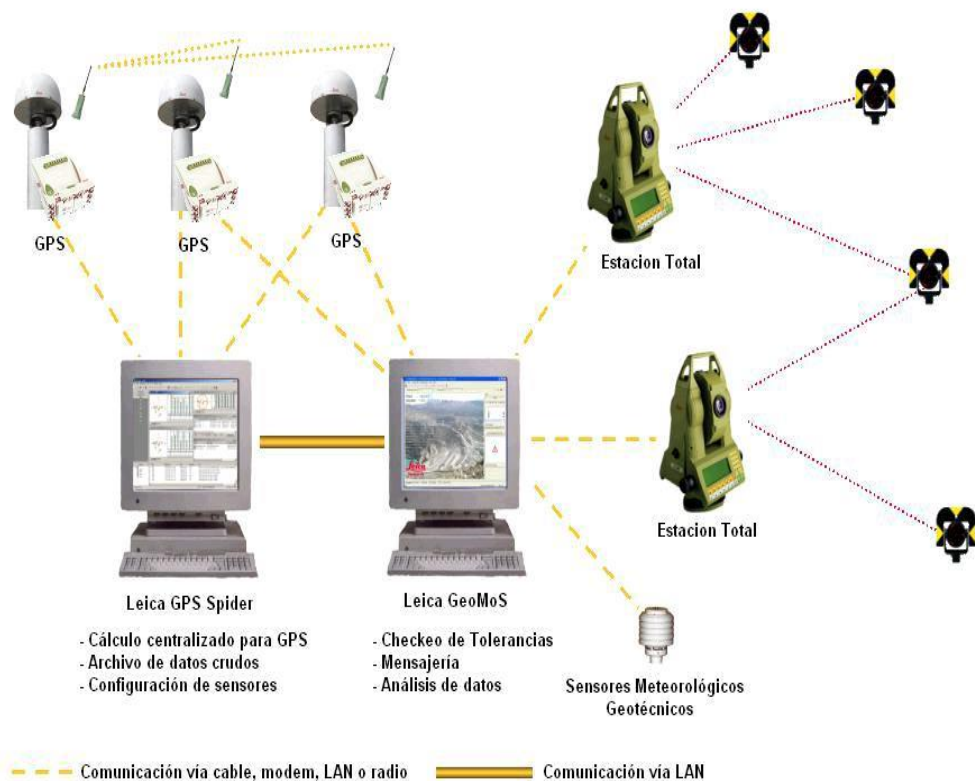


Figura 15 - Esquema del sistema Geomos

Es importante destacar que si bien el pilar donde se monta la TPS y el soporte de la antena GNSS están en parte dentro de la caseta, sus estructuras son independientes, es decir que cualquier movimiento que pueda sufrir la caseta, en un rango de 5 cm aproximadamente, no va a afectar la posición del pilar o el soporte de la antena GPS.

Los prismas se distribuyen de forma homogénea por los bancos de la mina, en los lugares que se consideran críticos por ejemplo por la presencia de estructuras geológicas (pliegues, fallas, diaclasas), se densifica la red a criterio del personal idóneo. Estos elementos se van colocando a medida que el proyecto va avanzando puesto que una vez que una fase avanza los bancos quedan aislados y son de difícil acceso, es decir que si algún prisma se cae o rompe por algún motivo difícilmente puede ser reinstalado o recuperado.

Los prismas empleados son de la marca CST o Leica, de tamaño estándar, montados sobre una jabalina de acero que se clava en el suelo o roca, y posee una chapa baliza de unos 60 x 60cm de color blanco y rojo para visualizarlos a la distancia.

Al instalar cada prisma se debe cargar las coordenadas de su ubicación y su código de identificación en el modulo Geomos Monitor para que las TPS puedan hallarlos.

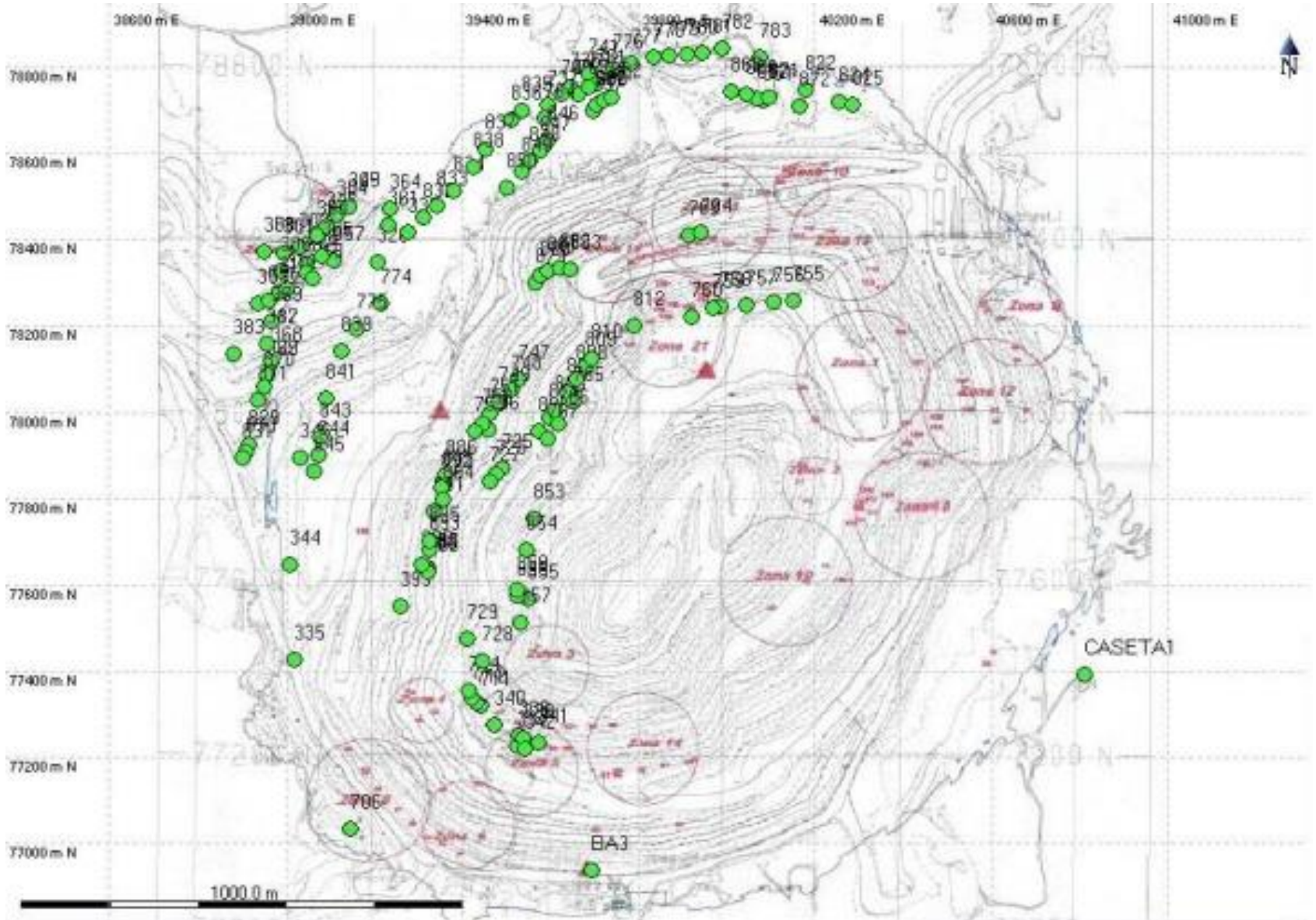


Figura 16 - Distribución de prismas Caseta B – Alumbraera – Año 2006

#### IV.4. Características del Sistema

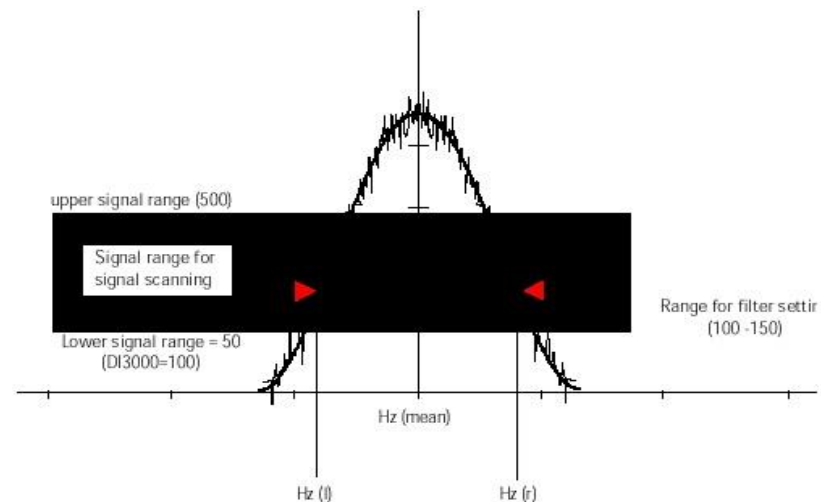
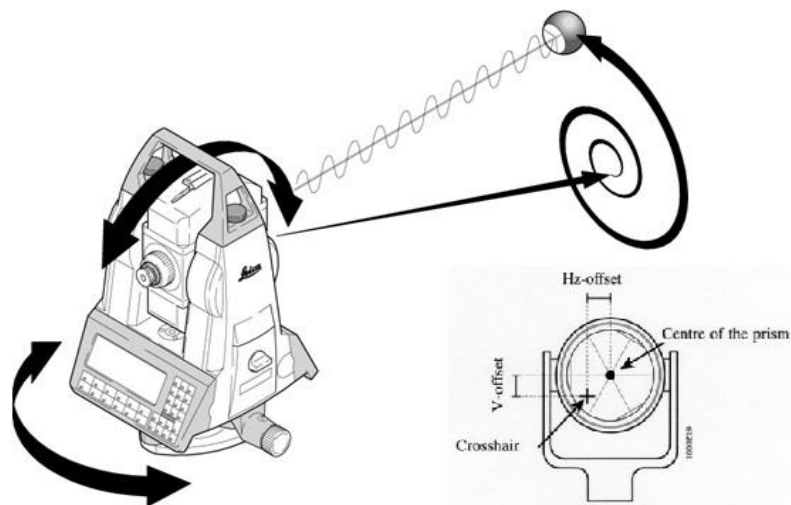
- **Equipos:** Las equipos TPS son modelo TCRA 1201 R300 con precisión angular H y V de  $\pm 1$  segundo de arco ( $1''$  o  $0.3$  mgon). Y los GPS, antena AT GG1202 y receptor GX1230 GG.

- Corrección automática de posición:

Hay una estación permanente GNSS que transmite la corrección en frecuencias de radio VHF/UHF. Los receptores GPS de las casetas reciben la corrección y la introducen al Geomos Monitor que a su vez lo transmite a las TPS. La velocidad de corrección GNSS a TPS es de 1Hz es decir que corrige segundo a segundo.

- **Rastreo automático:**

Las TPS poseen dos métodos de reconocimiento automático ATR y PS. El sistema ATR o Automatic Target Recognition transmite un haz laser y rastrea su rebote en el objetivo mediante una cámara tipo CCD (en español “dispositivo de carga acoplada”) y con movimientos en espiral ubica la posición del prisma. Con la cámara CCD mide el desplazamiento de los hilos del retículo con el centro del prisma. El sistema PS o Power Search en cambio emite un haz laser y mide la intensidad de retorno. Y en el punto donde tiene la mayor intensidad de retorno de señal toma la ubicación del centro del prisma. Según el fabricante el modo ATR tiene un alcance de 4Km sacrificando precisión angular y el PS de solo 2Km.



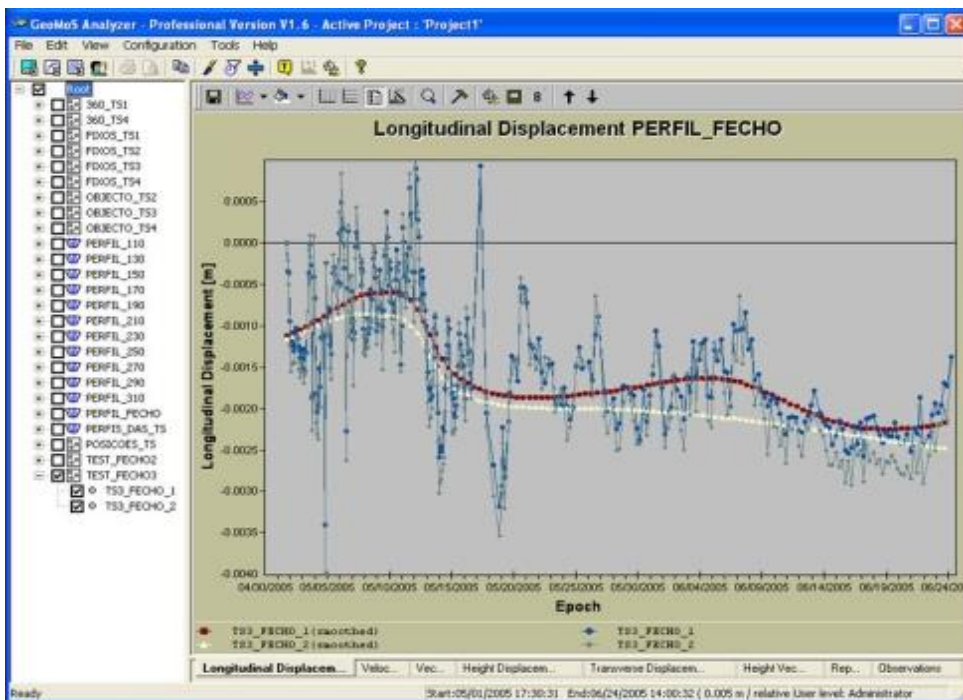
Distribución de la Señal de Retorno

- **Ciclos de medición:**

El sistema mide los objetivos por ciclos. Estos ciclos se configuran y según las necesidades se pueden armar grupos y subgrupos de prismas con distintas prioridades de medición. Por ejemplo, después de haber medido todos los prismas en un ciclo general, puede medir un grupo de prismas ubicados por ejemplo en una falla geológica activa y así tener más información de las zonas críticas.

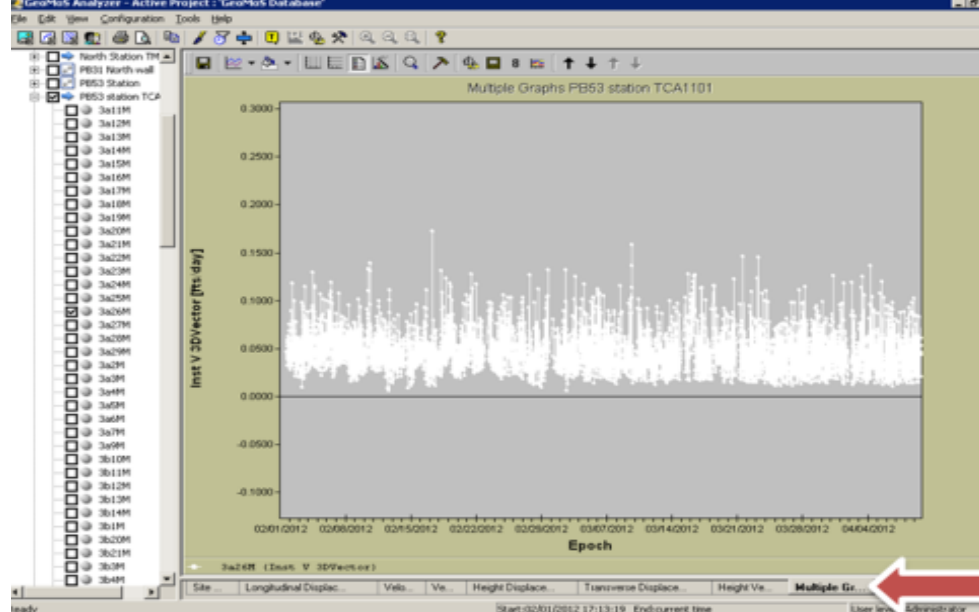
- **Tiempos de medición:**

Cada TPS tiene aproximadamente 80 prismas y puede medir todos ellos en 30 o 40 minutos es decir que demora en promedio unos 30 segundos en encontrar y medir un prisma. Con estas velocidades se pueden medir cada prisma como 20 veces por día o más lo que nos da un gran volumen de información. Esto sería casi como tener un seguimiento continuo de cada punto. Al ser las TPS independientes de supervisión u operador, los equipos miden 24 horas al día salvo algún desperfecto.



- **Análisis:**

Con tal volumen de información son muchas las posibilidades de análisis que se tienen en comparación con el método manual empleado anteriormente. El Modulo Analyzer nos permite visualizar la información en 2 y 4 dimensiones (X, Y, Z, tiempo). Como tenemos incluido la variable tiempo, también se analizan velocidades y aceleraciones. Los movimientos se pueden modelizar con regresiones de tipo lineal, cuadrática o polinómicas, entre otras opciones. Con estas regresiones puede extrapolarse valores y predecir comportamientos futuros y llegar a determinar con anticipación un evento catastrófico.

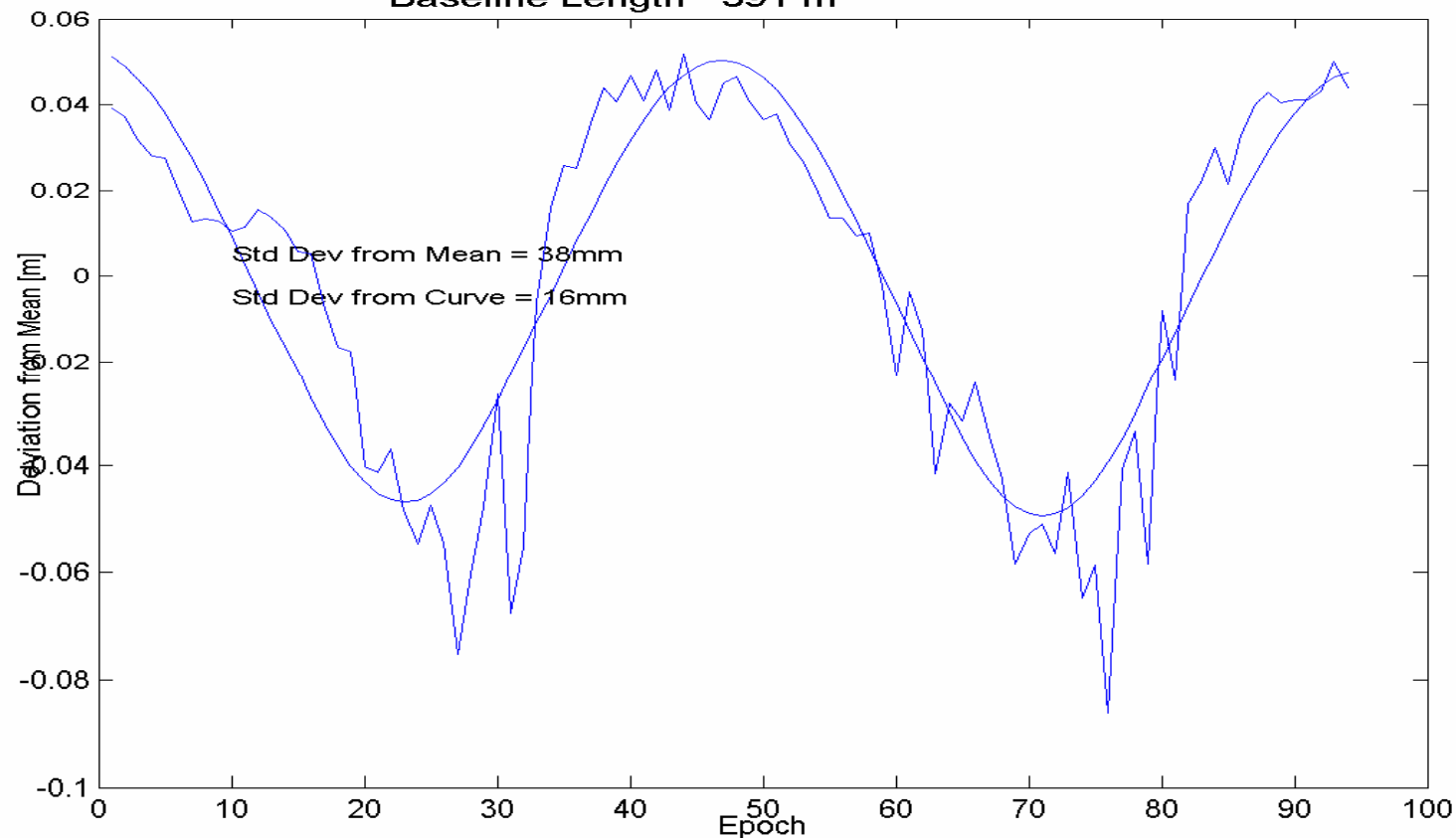


• **Modelo Atmosférico:**

Como sabemos todo método topográfico óptico o electromagnético es afectado por problemas de refracción inevitablemente. Al realizarse las mediciones las 24 horas del día, cada medición se ve afectada por efectos de refracción que son variables a lo largo del día y del año ya que depende de temperatura, presión y humedad. El software permite ajustar las mediciones implementando un modelo atmosférico que contempla las variaciones en distancias y ángulos. Estos valores fueron determinados por Adam Chzarnowsky en 2006 por una experiencia realizada en una mina de Chile de similares características climáticas.

Variación	Direcciones Horizontales			Direcciones Verticales		
	Día	Noche	24 h	Día	Noche	24 h
	2.6"	3.7"	3.1"	4.0"	4.7"	4.3"

### VCR Deviation from Mean and Cyclic Curve Fitting Baseline Length ~391 m



- **Alarmas:**

Según las características del sitio como ser tipo de rocas, estructuras geológicas, presencia de napas y otros factores, el personal de Geotecnia configura el sistema de alarmas del Modulo Monitor. Estas pueden ser por valores de desplazamiento, valores de velocidades y valores de aceleración. Según sea los valores se disparan distintos niveles de alarma ya sea como un simple llamado de atención o un aviso de colapso inminente de un banco o talud. El sistema de alarma emite un aviso vía mail a los supervisores y según el nivel de alarma, puede emitir un llamado automático al teléfono personal de los supervisores y técnicos del área.

#### IV.5. Limitaciones y fuentes de errores

- **Refracción atmosférica:**

Si bien se modeliza el comportamiento de este factor, la atmosfera es un medio muy complejo por lo tanto el modelo falla muchas veces. Aparte algo que no se puede introducir en el modelo es por ejemplo sólidos en suspensión, neblinas, precipitaciones, etc. Esto trae errores o ruido en las series de medición lo cual puede llegar a disparar una falsa alarma en algunos casos. O incluso el sistema puede dejar de medir bajo ciertas condiciones por no poder lograr las precisiones esperadas.

- **Rastreo automático:**

Si bien con el ATR se descarta la necesidad de un operador que realice la búsqueda y medición de cada prisma, eliminando también el factor humano (posible fuente de error), el instrumento no es capaz de observar situaciones particulares y tomar decisiones, por ejemplo que un prisma se encuentre caído.

- **GNSS:**

Los desplazamientos que el sistema debe detectar son del orden subcentimétrico. Por lo tanto, el nivel de precisión necesario para los puntos de control GNSS es milimétrico y no es fácil de obtener incluso con correcciones RTK. La geometría y visibilidad de los satélites no siempre son buenas y más en este tipo de explotaciones donde las casetas de monitoreo están próximas a las paredes. El retardo troposférico puede causar de 3 a 5mm de error en vertical. El multicamino también influye. Si bien hay filtros específicos para este problema aun así genera ruido en las mediciones.

En estos esquemas de monitoreo plantean un escenario muy particular para los sistemas GNSS- RTK ya que los puntos de control están prácticamente quietos o con movimientos de orden de milímetros. Al proporcionar actualizaciones de posición GNSS a la TPS, no se puede suponer que la posición de la antena en una época concuerde con la de una época anterior. Es decir que no puedo asegurar que la corrección introducida a las TPS están afectadas por un retardo (no es instantánea. Hay muchos factores que intervienen). Una forma de manejar esto es modelar el movimiento del punto de control como algo estático y añadir las correcciones en forma de ruido del proceso y luego con una regresión modelar el movimiento del punto.



## V. CONCLUSIONES

Para monitoreo de taludes, con precisiones subcentimétricas está demostrado que el sistema da resultados satisfactorios. Incluso se pudo prevenir varios eventos evitando pérdidas en vidas humanas, daños a la propiedad y tiempos de parada no programada. Es recomendable siempre agregar instrumentos geotécnicos como complemento que en el caso de Minera Alumbraera si los posee, pero en el presente trabajo nos limitamos solo a analizar los instrumentos geodésicos y topográficos.

El costo del sistema de monitoreo ronda en orden de los U\$S 250.000, es compatible y justificable considerando el orden de valores que se manejan en un proyecto minero a gran escala, donde por ejemplo una hora de parada no programada de una pala cargadora ronda los U\$S10.000; o una hora de parada de la Mina completa tiene un costo del orden de los cientos de miles de dólares.

Este tipo de sistemas de monitoreo pueden aplicarse también a otros tipos de estructuras. Pero por su valor tecnológico elevado es necesario realizar previamente un análisis de costos. Por ejemplo en el caso de un dique difícilmente se justifique por el hecho que los movimientos a determinar son muy pequeños y los en tiempos prolongados (relacionados con los tiempos de embalse y desembalse o plan de llenado).



**V. BIBLIOGRAFIA**

**Adam Chrzanowski, Anna Szostak-Chrzanowski.** Canadian Centre for Geodetic Engineering, University of New Brunswick, Canada. *DEFORMATION MONITORING SURVEYS – OLD PROBLEMS AND NEW SOLUTIONS (2009)*

**Irineu da Silva – Wernher Ibañez Leon**

*Técnicas Modernas para el Monitoreo de Estructuras a partir del uso de Estaciones Totales Motorizadas y Redes de Receptores GNSS – Proyecto Minero Bajo la Alumbrera, Argentina.*

Actas XXIV Reunión Científica de la AAGG Geodésia 2009

**Adam Chrzanowski.** Canadian Centre for Geodetic Engineering University of New Brunswick, Canada

*ACCURACY EVALUATION OF GEODETIC MONITORING OF DEFORMATIONS IN LARGE OPEN PIT MINES*

3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006

**Holger KIRSCHNER** Leica Geosystems AG, Switzerland- *The Kinematic Potential of Modern Tracking Total Stations - A State of the Art Report on the Leica TPS1200+* 1st International Conference on Machine Control & Guidance 2008 1

**Leica TPS1200.** Leica Geosystems. *Manual del Usuario.* Versión 4.0 Español

**GeoMos.** Leica Geosystems. *Manual del Usuario.* Versión 3.0 Español

**N. Brown, L. Troyer, O. Zelzer and J. van Cranenbroek** - *Advances in RTK and Post Processed Monitoring with Single Frequency GPS* Journal of Global Positioning Systems (2006) - Vol. 5, No. 1-2:145-151

**JULIO MANUEL DE LUIS RUIZ.** UNIVERSIDAD DE CANTABRIA - *Contraste en la ejecución de auscultaciones geodésicas por métodos clásicos y con láser escáner.* - Santander, Diciembre de 2009

**Jordi Corominas.** Universidad Politécnica de Cataluña - *TIPOS DE ROTURA EN LADERAS Y TALUDES*

**Ing. Alejandro Pujol - Ing. Diego Aguiar** - *APLICACION DE CONTROLES MICROGEODESICOS A LA EVALUACION DE LA SEGURIDAD DE LAS PRESAS CABRA CORRAL, PEÑAS BLANCAS Y EL TUNAL.*

**Alejandra Sepúlveda Barraza.** UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID - *Comportamiento sísmico de taludes de roca*

**Brajam Das.** Decano del College of Engineering and Computer Science en la Universidad del Estado de California, en Sacramento. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.*

# MUCHAS GRACIAS POR VUESTRA ATENCIÓN

