



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

Uso de imágenes satelitales INSAR y monitoreo automatizado sistema GEOMOS para optimizar el monitoreo geotécnico, caso mina Utunsa – Apurímac – Perú

A.C. Torres, J.L. Ramírez

UNMSM – DARES Tech, Lima, Perú

RESUMEN: Este trabajo técnico establece el monitoreo geotécnico automatizado y el uso de las imágenes satelitales InSAR como complemento a la instrumentación geotécnica convencional implementada en el Pad de Lixiviación Utunsa, de la Unidad Minera Utunsa (UM Utunsa), realizado durante el periodo del mes de marzo del 2018 al mes de junio del 2019. La UM Utunsa está ubicada en los distritos de Haqira y Quiñota, en las provincias de Cotabambas y Chumbivilcas, departamentos de Apurímac y Cusco.

ABSTRACT: This article establishes the automated geotechnical monitoring and the use of InSAR satellite images as a complement to the conventional geotechnical instrumentation implemented in the Utunsa Leaching Pad, of the Utunsa Mining Unit (UM Utunsa), carried out during the period of March 2018 to June 2019. UM Utunsa is located in the districts of Haqira and Quiñota, in the provinces of Cotabambas and Chumbivilcas, departments of Apurímac and Cusco.

1 INTRODUCCIÓN

El siguiente artículo muestra el monitoreo geotécnico automatizado y el uso de las imágenes satelitales como complemento a la instrumentación geotécnica convencional implementada en el Pad de Lixiviación Utunsa, UM Utunsa, realizado durante el periodo del mes de junio del 2018 al mes de junio del 2019, enfocándose en un evento que fue detectado desde los meses de febrero a marzo del 2019. La UM Utunsa, se ubica en los distritos de Haqira y Quiñota, en las provincias

de Cotabambas y Chumbivilcas, departamentos de Apurímac y Cusco, con coordenadas UTM Este 794211.8 y Norte 8405922.9.

El uso de estas nuevas tecnologías en el monitoreo geotécnico para predecir un evento no deseado como: falla de un talud, deslizamientos, entre otros, en las operaciones mineras y en obras civiles, se está haciendo cada vez más conocido y usado. En operaciones de gran minería, el uso de estas nuevas tecnologías de alta precisión como las imágenes satelitales InSAR (banda C) y el monitoreo automatizado con estaciones robóticas está muy diversificado por que permiten la oportuna detección de anomalías en la deformación e identificar los desplazamientos que tienden a desarrollarse en las infraestructuras mineras como: tajos abiertos, plataformas de lixiviación (Pads), depósito de residuos mineros, depósito de desmontes, planta de procesos y presas de relave. El InSAR y las estaciones robóticas se complementan, con la instrumentación usado convencionalmente como: piezómetros, inclinómetros, extensómetros y monitoreo con hitos topográficos. Estos instrumentos son de gran ayuda porque previene y alerta oportunamente a la operación minera evitando daños, en primer lugar, a los operadores mineros, en segundo lugar, a los equipos y finalmente, daños a la propiedad, al medio ambiente y la imagen de la empresa.

Reducir el riesgo geotécnico en las actividades mineras es parte fundamental de la seguridad de una operación minera. Los estándares de seguridad implementados por las compañías mineras

son cada vez más altos y rigurosos, debido a que las empresas se han convencido que no es rentable economizar en los gastos del monitoreo geotécnico, por esa razón, en la gran minería en el Perú se ha implementado satisfactoriamente estas buenas prácticas de seguridad del uso de la instrumentación de alta precisión para monitorear estas actividades que permiten reducir y eliminar la exposición al peligro y al riesgo de sus unidades mineras.

El monitoreo y el análisis de la instrumentación geotécnica permite tomar medidas inmediatas para controlar los riesgos geotécnicos, logrando minimizar estos riesgos a niveles aceptables de acuerdo con los criterios de aceptabilidad (ver Figura 1).

ALERTA	Descripción	Desde (cm/día)	Hasta (cm/día)	Velocidad (cm/día)	Tiempo	Controles Geotécnicos
VERDE	Estable	0.0	0.3	0.3	24 HORAS	La operación se desarrolla normalmente.
AMARILLA	En Observación	0.3	2.5	2.5		Realizar inspecciones y monitoreo más frecuentemente.
NARANJA	Posible Inestable	2.5	5.0	5		Realizar inspecciones y monitoreo de forma permanente durante los turnos día y noche.
ROJA	Inestable	5.0	>5.0	>5.0		Retirar a personal y equipos inmediatamente, activar el plan de emergencias.

Figura 1: Umbrales de deformación para la UM Utunsa.

Sin embargo, en la mediana minería, para el monitoreo geotécnico no se toma en cuenta el uso y beneficio de las imágenes satelitales InSAR y del monitoreo automatizado por estaciones robóticas, debido, en primer lugar, al desconocimiento técnico, en segundo lugar, adversos a la innovación y finalmente, a los aspectos relacionados al costo, entre otros.

En la UM Utunsa este monitoreo fue implementado mediante el uso de la estación robótica del sistema GEOMOS para un monitoreo geotécnico en tiempo real y como complemento las imágenes satelitales InSAR para monitorear los desplazamientos en forma Global de todas las infraestructuras mineras. Además, esta información se correlaciona con los registros del monitoreo convencional, de los piezómetros, inclinómetros, extensómetros y de hitos topográficos, con el fin de calibrarlos con estos instrumentos y obtener unos umbrales adecuados y realistas para la unidad minera, con el fin de prevenir y alertar posibles escenarios que puedan llevar a un deslizamiento o evento no deseado de sus infraestructuras mineras.

2. UNIDAD MINERA UTUNSA.

2.1. Ubicación

Unidad Minera (U.M.) Utunsa forma parte del proyecto Anabí, en el sur del Perú, localizada a una altitud promedio de 4500 m.s.n.m. La mina está ubicada entre el distrito de Haquira, provincia de Cotabambas, región Apurímac, distrito de Quiñota, provincia de Chumbivilcas, región Cusco. En el área del proyecto se diferencian dos estaciones claramente marcadas en el año: la estación lluviosa, entre los meses de noviembre a mayo, y la estación seca, entre los meses de junio a octubre. La temperatura promedio en la zona es de 5°C.



Figura 2: Ubicación del Pad de lixiviación de la UM Utunsa. (MDH, 2019, p. 18)

3. TECNOLOGIA APLICADA AL MONITOREO GEOTÉCNICO

3.1. Imágenes Satelitales

La técnica InSAR es una forma eficaz de medir las deformaciones de la superficie terrestre derivadas de fenómenos de subsidencia, levantamientos del terreno, movimiento de taludes y laderas, así como deslizamientos. InSAR realiza mediciones de alta densidad en grandes áreas utilizando señales de radar de satélites en órbita terrestre para medir cambios en la superficie terrestre con altos grados de precisión de medición y detalle espacial (Galloway y otros, 2000).

Los satélites radar de apertura sintética (SAR) emiten señales u ondas electromagnéticas que rebotan sobre la superficie terrestre y vuelven al satélite. La técnica de procesamiento interferométrico, conocida como InSAR, consiste en medir el tiempo de retorno de las ondas electromagnéticas, lo que se conoce como la distancia de fase, entre el área objeto de interés y el satélite radar. Es decir, se mide el tiempo de viaje de ida y vuelta de estas ondas al satélite. Para ello se utiliza un conjunto de imágenes SAR de la misma área adquiridas en diferentes momentos y las "interfiere" (diferencia), dando como resultado mapas llamados interferogramas.

Los interferogramas se traducen en mapas de deformación que muestran el desplazamiento de la superficie del suelo (cambio de rango) entre distintos períodos de tiempo.

Para realizar un análisis continuo sobre un área concreta (como en el caso de la UM Utunsa), es necesario, primeramente, obtener un mapa de línea de base, el cual consiste en medir la evolución de la superficie en un periodo concreto de tiempo (se recomienda usar entre 20 y 25 imágenes para obtener una buena redundancia de datos). Una vez obtenido este primer procesado de datos interferométricos, se procede a actualizar las mediciones con distinta frecuencia (cada semana, mes etc.). Los mapas de deformación actualizados se producen a partir del procesado InSAR que se realiza de cada nueva imagen. Es decir, cada vez que hay una nueva toma de satélite se alinea con el resto de las imágenes de la base de datos y se realiza un procesado InSAR (con compensación de cambios topográficos, compensación de perturbaciones atmosféricas, etc) para actualizar la serie temporal. La actualización de los mapas de deformación permite generar mapas de alertas para zonas críticas, mediante la definición de umbrales de movimiento.

Los mapas de deformación se presentan en forma de mapa de puntos de deformación, los cuales corresponden a la nube de puntos medidos en el tiempo. Cada punto contiene la serie temporal de movimiento. Los mapas de deformación también pueden presentarse en forma de mapas de isolíneas de deformación, los cuales muestran las zonas de movimiento por rango de deformación (ver figura 4).

Un dato importante a tener en cuenta respecto a los satélites radares es el hecho que miden el movimiento del suelo de acuerdo con línea de adquisición (LOS), la cual no es completamente cenital, sino que oscila entre los 20 y 30 grados en relación al eje vertical. Es por esta razón que los sensores radar están compuestos por dos modos o geometría de adquisición de datos: modo ascendente y descendente. La combinación de ambas geometrías permite obtener una mayor cobertura de puntos de medición y eliminar zonas de manca sensibilidad, por ejemplo, taludes muy verticales que solo se pueden medir con uno de los dos modos. La siguiente Figura 3, muestra un ejemplo del satélite para el monitoreo desde el espacio.

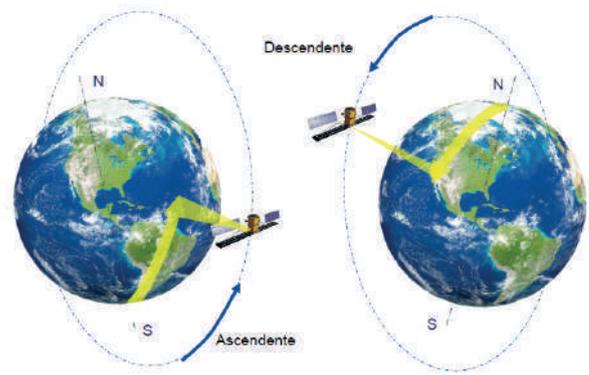


Figura 3: Órbita ascendente y descendente del satélite. (DARES Tech, 2021)

Secciones transversales de los taludes: Corresponden a la evolución de la cota a partir de los resultados de la deformación obtenidos en la serie temporal de cada punto.

Las secciones transversales son una herramienta única de Dares para identificar: fallas, líneas de ruptura en taludes, etc.; analizar el comportamiento dinámico de los taludes; llegar a identificar si el movimiento es superficial o viene de una capa geológica más profunda; saber si el talud se frena o se acelera en los diferentes bancos; definir mejores campañas de geotecnia como donde instalar los inclinómetros para caracterizar el talud, decidir si modificar la inclinación del talud, etc.



Figura 4: Secciones transversales (DARES Tech, Utunsa, 2019)

La UM Utunsa, contrató a la empresa Dares Technology (DARES) para brindar el servicio de monitoreo satelital InSAR, la cual adquirían y procesaban las imágenes con un algoritmo especializado para luego entregar un informe del monitoreo detallado cada 13 a 15 días, que cubría el periodo de junio 2018 a diciembre 2018. La información contenía un análisis detallado de las deformaciones con interpretaciones, secciones transversales, aceleraciones y las recomendaciones correspondientes.

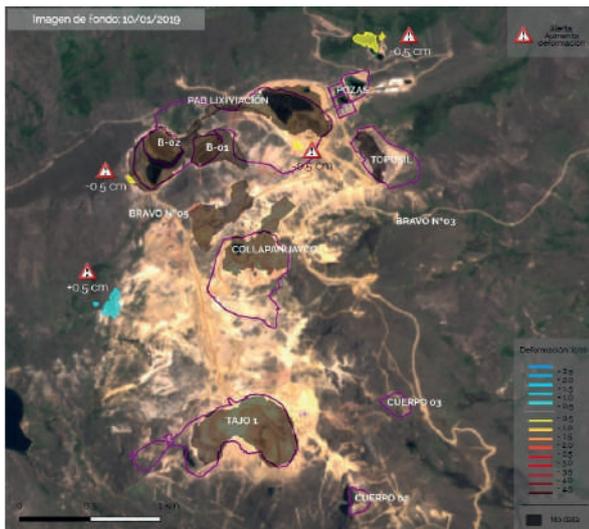


Figura 5: Imagen satelital de la UM Utunsa, diciembre 2018 (DARES Technology, 2018)

El monitoreo se realizó en todas las infraestructuras mineras de la UM Utunsa mostrando la deformación total (ver Figura 5). Sin embargo, en la zona del Pad de lixiviación mostraron deformaciones superiores a 0.5 cm con respecto al periodo anterior. Esta información ayudo de manera eficiente, al detallar e identificar las áreas con las deformaciones críticas en la mina que estaban acelerando y cómo era su comportamiento y posteriormente su verificación en superficie por parte de los ingenieros geotécnicos de la unidad minera.

3.2. Monitoreo Automatizado Sistema GEOMOS

Es un instrumento electro – óptico de alta precisión en topografía, geodesia, geomática y monitoreo geotécnico, para medir desplazamientos, deformaciones relativas, movimientos de grietas, etc, cuyo funcionamiento se apoya en la tecnología electrónica, cuya información es en tiempo real y las alertas pueden ser transmitidas por medio de notificaciones o mensajes, al correo electrónico o al celular.

Cuenta con un Geo Analizador (Geo Analyser) para detectar desplazamientos muy pequeños que, a través del tiempo, pueden generar deslizamientos o roturas en diversas estructuras como: taludes o laderas. Proporcionando información para la toma de decisiones de manera efectiva, permitiendo, así, ampliar la seguridad en la zona de trabajo.

En el caso del monitoreo automático las correcciones atmosféricas se realizan tomando una o varias distancias patrón, las cuales se obtienen midiendo a prismas que se colocan en zonas muy estables.

Además, se cuenta con una vista atrás que está conformada por un pilar en donde se coloca un

prisma para que la estación total automatizada pueda orientarse en cada uno de sus monitoreos y de esta forma realice compensaciones por ángulo y distancia.

El equipo cuenta con el sistema de Reconocimiento Automático del Objetivo (Automatic Target Recognition – ATR), mediante el cual se ubica la posición del prisma para realizar la medición, en algunos casos no se posiciona en el centro del prisma, este efecto es normal, para acelerar la búsqueda con ATR. Estas pequeñas desviaciones se corrigen al momento de realizar las mediciones en las 2 posiciones: el ángulo Hz y el ángulo V.



Foto 1: Estación total de monitoreo automatizado Leica TM30 sistema GEOMOS.

4. RESULTADOS

4.1. Antecedentes

En diciembre del 2018, iniciada la temporada de nevada, lluvias y tormentas, el área de Geotecnia UM Utunsa, tenía entre las actividades a realizar en el día en día, el control geotécnico mediante las inspecciones de campo, monitorear con la instrumentación geotécnica, los componentes de la mina como: Botadero Collpahuayco, el apilamiento de los materiales del Pad de lixiviación, Pozas PLS-IILS y GE, tajo abierto entre otras infraestructuras. Al comienzo de la operación se contaba con la instrumentación geotécnica convencional distribuida de la siguiente manera (ver Figura 6).

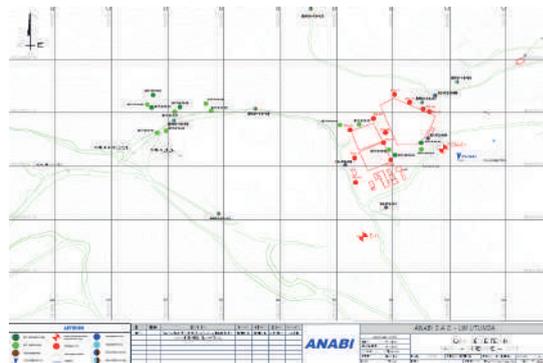


Figura 6: Distribución de la instrumentación geotécnica de la UM Utunsa (Utunsa, dic, 2018).

Los registros de los extensómetros mecánicos instalados en el ámbito del Pad, reportaron el incremento del desplazamiento de 4 cm en 40 días (ver Figura 7):

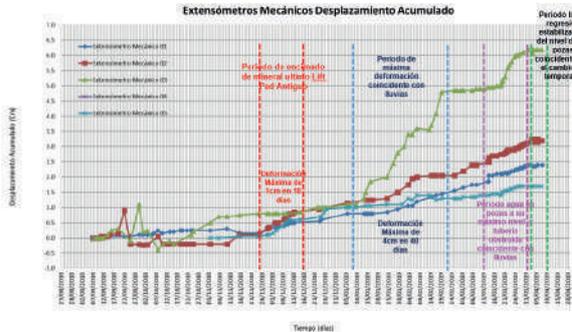


Figura 7: Monitoreo Extensómetros Mecánicos (Fuente: Elaboración propia).

La gráfica nos mostró al inicio un periodo lineal regresivo y estabilización del nivel de la poza GE coincidentemente, con el cambio de temporada del aumento de las precipitaciones este incremento de lineal a progresivo a tendencia crítica.

El área de topografía mina era el encargado de registrar el monitoreo con hitos topográfico con una frecuencia diaria hasta abril del 2019. En ese mes se implementó el monitoreo robótico automatizado sistema Geomos, registrándose mediciones cada hora, calibrándose el periodo dependiendo de la tendencia de las lecturas en los componentes mineros.

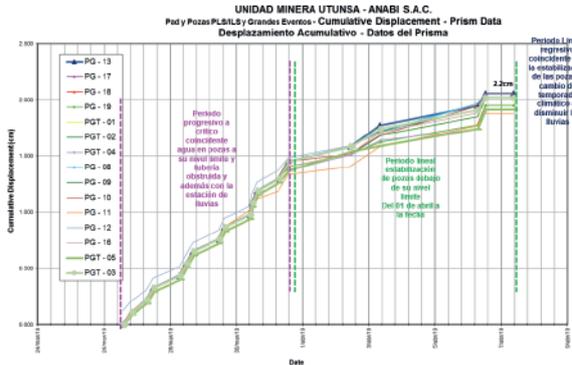


Figura 8: Monitoreo de los hitos topográficos (Fuente: Elaboración propia).

La gráfica de la Figura 8, nos muestra el Periodo Lineal regresivo en 2.2 cm/día (alerta amarilla), coincidente con la estabilización de las pozas y cambio de temporada climático al disminuir el periodo de lluvias



Figura 9: Registro de Piezómetro IC-PZ-04 (Fuente: Elaboración propia)

La gráfica de la Figura 9, muestra el registro del piezómetro IC-PZ-04 ubicado dentro de Planta.

4.2. Situación

Debido a las evidencias detectadas e identificados los riesgos geotécnicos que podría acontecer en una falla de las pozas del Pad, se tomó la decisión de contratar los servicios de DARES, para complementar y optimizar el monitoreo y control geotécnico convencional y de las estaciones robóticas en la UM Utunsa a través de imágenes satelitales InSAR. Con esta nueva tecnología de alta precisión se pudo reforzar los planes de acción en las zonas que requerían monitoreo mediante las inspecciones de campo y así tomar decisiones más asertivas, como, alertar oportunamente a la operación minera y evitar un evento no deseado.

El primer boletín de DARES (ver Figura 10), con las anomalías reportadas, puso en evidencia los agrietamientos y fallamiento en el ámbito del Pad, y ayudo a identificar y verificar, mediante las inspecciones de campo realizadas insitu, los agrietamientos que comprometían la estabilidad física del Pad y Pozas (ver Fotos 2 y 3).

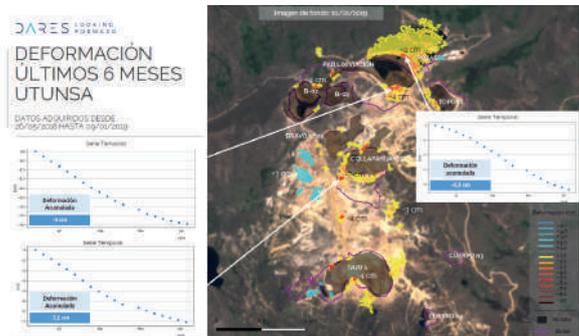


Figura 10: Primer boletín de Dares, Registro semestral, diciembre 2018 (DARES Tech, dic 2018).



Foto 2: Grieta ubicada al norte del Pad de lixiviación (Utunsa, dic 2018).



Foto 3: Grieta aledaña a la Poza de GE y la zona sur de las pozas. (Utunsa, enero 2019).

En el boletín del 14.02 al 22.03 (ver Figura 11) y al corroborarlo con la instrumentación y las inspecciones de campo, se aprecia que la deformación de la zona de las pozas presenta Deformaciones en 36 días hasta -2.5 cm y de 12 días -1cm. Debido al incremento de deformación de -2.5 cm que se presentó hace 36 días DARES empezó a evaluarlo con mayor frecuencia detectando hace 12 días una deformación acelerada de -1cm por lo que se solicitó elaborar un estudio de velocidad inversa para detectar el momento de un posible colapso en las zonas de las pozas PLS/ILS y GE.

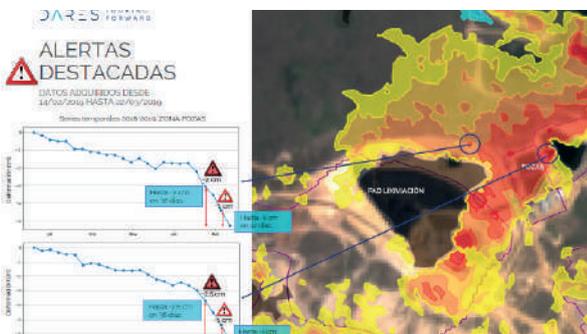


Figura 11: Boletín de Dares 14.02.19 al 22.03.19 (DARES Tech, 2019).

Se encontró que el NF de la poza de GE estaba al límite debido a las intensas lluvias (ver Foto 4), en consecuencia, el volumen de capacidad de carga de las pozas de GE aumentó, incrementando la posibilidad de que ocurra un deslizamiento debido

al peso y al empuje; también, se encontró que una tubería estaba obstruida.



Foto 4: Poza Grandes Eventos (Utunsa, 2019).

Ante el modelo predictivo del InSAR de un posible colapso, Geotecnia dio la alerta a la UM Utunsa el 27.03.19, recomendando paralizar el apilamiento del material en el Pad de lixiviación, controlar y evacuar el volumen del agua de las pozas ILS, PLS y GE para reducir el peso y evitar la fuerza del empuje y proponer dentro de sus planes de acción una campaña de perforación hidrogeológica para la despresurización. (ver Foto 6).

En el boletín del 22.03 al 27.04 se aprecia que la deformación de la zona de las pozas presenta una desaceleración de las deformaciones de 17 días menor a -1cm, la cual se ha corroborado con el monitoreo de los prismas, inclinómetros y piezómetros instalados en estas infraestructuras presentando condiciones de estabilidad (ver Figura 12).

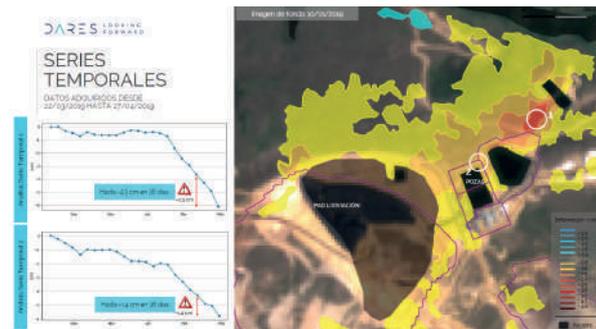


Figura 12: Boletín 22.03.19 al 27.04.19 (DARES Tech, 2019)

4.3. Planes de Acción

El área de Geotecnia y Mina, ante estas evidencias identificadas tomaron la decisión de ejecutar los planes de acción que consistió en reducir la carga de material del Pad para minimizar el peso y la fuerza del empuje en la zona Norte del Pad. Además, se instaló nuevos extensómetros mecánicos en cada grieta para registrar el movimiento y su desplazamiento (ver Foto 5).



Foto 5: Reducción de carga del material, perfilado del talud del Pad e implementación de Extensómetros Mecánicos (Utunsa, enero 2019).

Luego, se procedió a evacuar el agua de la poza de GE, hasta reducir el volumen a sus niveles mínimos para minimizar también, el peso de la poza y la fuerza del empuje hacia el NE talud que soporta dicha estructura.

Además, se realizó una campaña de perforaciones hidrogeológicas para deprimir el nivel freático de la zona Norte del Pad y reducir la influencia del agua subterránea y la presión de poros en la fundación del Pad (ver Foto 6).



Foto 6: Punto de extracción de agua (Utunsa, 2019).

En el mes de abril del 2019, se instaló la estación de monitoreo robótica con el sistema Geomos para optimizar el monitoreo en tiempo real del Pad de lixiviación, lo cual fue un soporte para las auditorías de los organismos del estado como: MINEM, OSINERGMIN, ANA y OEFA.



Foto 7: Caseta de monitoreo. (Utunsa. 2019)

Con la implementación de la estación robótica Geomos se reforzó el monitoreo geotécnico convencional de las componentes en mención, llevando a cabo una campaña de instalación de prismas para tener un mayor control de la componente. El registro de los prismas se llevaba a cabo cada hora, evidenciando que las acciones tomadas por el área de Geotecnia mantuvieron los registros bajo los niveles de alertas geotécnicas de acuerdo con los

patrones de la UM Utunsa y según el criterio de estabilidad de Crude&Varnes (1962).

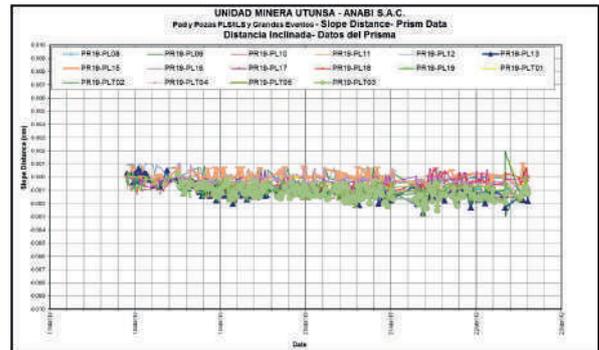


Figura 13: Registro del monitoreo con sistema GeoAnalyser (Utunsa, 2019).

Además, se implementó la instalación de una nueva instrumentación geotécnica que consistió en la colocación de piezómetros de cuerda vibrante, inclinómetros y estudios geofísicos en el ámbito del Pad y Pozas PLS- ILS y GE, para un mejor control de estos componentes.

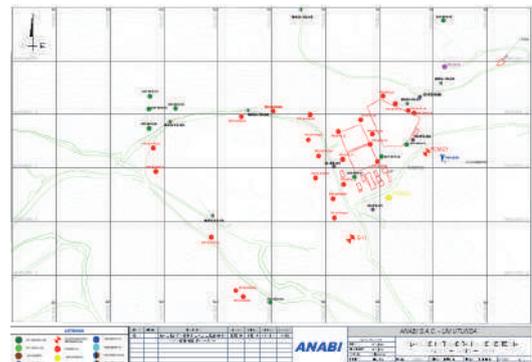


Figura 14: Distribución de la instrumentación geotecnia al finalizar el estudio. (Utunsa, 2019)

El boletín del mes de junio 2019, mostró un comparativo del monitoreo satelital InSAR desde el mes de marzo (10.03.19) al mes junio (14.06.19), donde se demuestra que los planes de acción tomados conjuntamente con las áreas de Geotecnia y Mina, solucionaron y redujeron el riesgo geotécnico del Pad y Pozas de UM Utunsa de la cual fue el éxito para el proyecto.

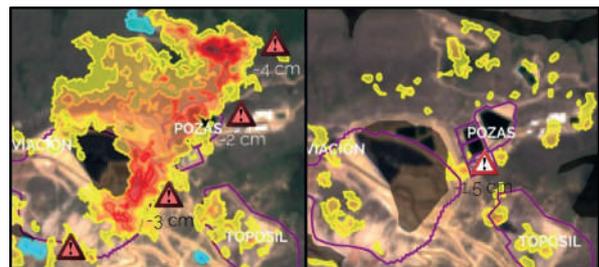


Figura 15: Boletines 10.03.19 y 27.06.19 donde refleja el cambio significativo del nivel de riesgo en las pozas PLS/ILS y GE (Dares Tech, 2019)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones

- El monitoreo con imágenes satelitales InSAR a pesar de no ser a tiempo real; es una excelente herramienta para la instrumentación geotécnica como complemento a las estaciones robóticas y la instrumentación convencional, debido a que nos ayuda a monitorear regionalmente y detectar oportunamente los riesgos geotécnicos en la operación minera.

- El Geomos es un monitoreo automatizado a tiempo real local, detectando también oportunamente los riesgos geotécnicos en la operación minera. Sin embargo, a comparación con el InSAR demanda mantenimiento y personal para el uso correcto de este equipo al igual que la instrumentación convencional.

- Si bien es cierto que esta información de la instrumentación robotizada y el InSAR, nos alerta ante un riesgo geotécnico en una infraestructura, esta deberá ser corroborado con las inspecciones de campo y deberán ser calibradas con la demás instrumentación como piezómetros, inclinómetros y extensómetros.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda, el uso de las imágenes satelitales InSAR como complemento del monitoreo robotizado del Geomos, debido que refuerza el control geotécnico convencional, optimizando en tiempo y ahorros de costos, manteniendo una operación segura y salvaguardando los intereses de la operación.

- Se recomienda, el uso del InSAR porque detecta oportunamente un riesgo geotécnico. Además, puede ser usado en cualquier nivel de operación minera sea de gran minería y/o de mediana minería como en el caso de Utunsa.

6. REFERENCIAS

- Geokon. (s.f.). High Tech S.A. Obtenido de Monitoreo y medición ambiental: <https://www.htsperu.com.pe/equipos-de-monitoreo-medicion-ambiental/instrumentos-para-monitoreo-de-suelos/extensometros/sistema-de-inclinometro-digital-mems-gk-604d-geokon>
- Irineu, DA Silva, León Wernher (2009) Técnicas Modernas para el Monitoreo de Estructuras a partir del uso de Estaciones Totales Motorizadas y Redes de Receptores GNSS – Proyecto Minero Bajo la Alumbra, Argentina
- Crude & Varnes (1996) Landslide Types and Processes. in Turner, A. K. y R. L. Schuster (eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board. Special Report 247, National Academy Press, Washington D.C., pp. 36-75.
- DARES TECH (2019) Informe técnico de Monitoreo Geotécnico InSAR Dares Tech - Mina Utunsa Anabí S.A