



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**“IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO GEOTÉCNICO  
INTEGRAL PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE TALUDES  
EN LA MINA ANTAPACCAY REGIÓN CUSCO -2017”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO CIVIL**

**AUTOR:**

**WALTER MANUEL REA OLIVARES**

**ASESOR**

**M.Sc. FELÍX GERMÁN DELGADO RAMÍREZ**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

**ADMINISTRACIÓN Y SEGURIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN**

**LIMA - PERU**

**2017**

**PÁGINA DEL JURADO**

.....  
Dr. Abel Alberto Muñiz Paucarmayta  
PRESIDENTE

.....  
M.Sc. Félix Germán Delgado Ramírez  
SECRETARIO

.....  
M.Sc. Carlos Mario Fernández Díaz  
VOCAL

## **DEDICATORIA**

A la Divina Providencia por brindarme la oportunidad de llegar a concluir esta etapa tan importante de mi vida,

A mi esposa Ana Whang e hijas Andrea Rea y Alejandra Rea, porque son mi inspiración de vida.

A mis mentores Javier Pérez Albela y Manuel García Rosell por sus valiosos consejos y enseñanzas.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres Wilfredo E. Rea Sipán y Raquel Olivares de Rea por educarme con valores y ejemplos de superación constante.

A mis hermanos Katty y Wilfredo que me motivan a alcanzar sueños que compartiré más adelante.

A mis familiares por su apoyo incondicional: Nancy, Lorenzo, Bertha, Hugo, Olga, Miriam, Marlene, Blanca, Orlando, Zoila y a los que ya partieron Gera, Julio, Carlos, Alejandrina y Raquel.

A mis amigos de mí centro laboral a quienes considero como mi segunda familia César, Domingo y Carmen.

A los docentes de la Universidad en especial a los maestros Teresa Gonzales, Martha Ames, Abel Muñiz, Félix Delgado y Carlos Fernández por demostrar su profesionalismo, entrega y dedicación por la enseñanza a los demás.

A mis amigos de las mineras quienes me motivaron a realizar esta investigación con la finalidad de comprender su labor sacrificada en mina.

Y de manera especial a Química Suiza por haberme permitido desarrollarme durante estos últimos 18 años a nivel personal y profesional, gracias Milan, Frank y Hans.

## DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Yo Walter Manuel Rea Olivares con DNI N° 15300965, a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, escuela de ingeniería civil, declaro bajo juramento que toda la documentación que acompaño es veraz y auténtica.

Así mismo, declaro también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Lima, 22 de Julio del 2017.

---

Walter Manuel Rea Olivares  
DNI N° 15300965

## **PRESENTACIÓN**

Señores miembros del Jurado:

En cumplimiento del reglamento de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, presento el proyecto de investigación titulado: “Implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de taludes en la mina Antapaccay, región Cusco - 2017”.

El desarrollo de esta investigación se debe a que cada año se registran una serie de accidentes fatales en las minas, por lo que se exige mayor seguridad, es sabido que para el diseño de los taludes se emplea el factor de seguridad el cual no permite tener un 100% de certeza sobre todos parámetros geotécnicos y los esfuerzos que actuarán en la vida de los taludes, por lo que se hace necesario emplear actualmente las probabilidades de falla, lo que implica estar prevenidos y para ello se debe aplicar el monitoreo. Esto exige el uso de un mayor número de instrumentos geotécnicos, lo que trae como consecuencia, la dificultad en el procesamiento de los datos, debido a la elevada frecuencia de lecturas, tornándose, en un gran problema. Los resultados obtenidos en esta investigación cumplen con el objetivo general que es implementar el sistema de monitoreo geotécnico integral en un servidor WEB externo, el cual permite integrar los datos de los sensores, procesarlos y obtener información relevante en tiempo real para la toma de decisiones.

La presente investigación se ha estructurado en siete capítulos. En el Capítulo I se indicó la realidad problemática, trabajos previos, teorías relacionadas al tema, formulación al problema, justificación, hipótesis y objetivo; en el Capítulo II se ubicó el diseño de la investigación, las variables y su operacionalización, la población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad, método de análisis de datos y aspectos éticos; en el Capítulo III se indicaron los resultados; en el Capítulo IV se encuentra la discusión; en el Capítulo V se establecieron las conclusiones; en el Capítulo VI se plasmaron las recomendaciones; en el Capítulo VII se indicaron las referencias bibliográficas y finalmente se colocaron los anexos.

Walter Manuel Rea Olivares

## ÍNDICE

PÁGINA DEL JURADO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD	iv
PRESENTACIÓN	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
I. Introducción	1
1.1 Realidad problemática	4
1.2 Trabajos previos	8
1.2.1 Internacionales	8
1.2.2 Nacionales	10
1.3 Teorías relacionadas al tema	13
1.3.1 Sistema de monitoreo geotécnico integral	13
1.3.1.1 Procedimientos para implementar un sistema	14
1.3.1.2 Características de los sensores de monitoreo	21
1.3.1.3 Generar mapas de riesgos con el sistema	38
1.3.1.4 Dimensiones e indicadores del sistema de monitoreo	50
1.3.2 Comportamiento de los taludes en los macizos rocosos	51
1.3.2.1 Ensayos de laboratorio de resistencia y deformabilidad	56
1.3.2.2 Resistencia, mecanismos de rotura	58
1.3.2.3 Discontinuidades, tipos, características	65
1.3.2.4 Estabilidad de taludes en el macizo rocoso.	70
1.3.2.5 Dimensiones e indicadores: Comportamiento de taludes	77
1.3.3 Software de procesamiento de datos	78
1.3.4 Marco conceptual	79
1.4 Formulación al problema	80
1.4.1 Problema general	80
1.4.2 Problemas específicos	80
1.5 Justificación del estudio	81
1.6 Hipótesis	82
1.6.1 Hipótesis general	82
1.6.2 Hipótesis específicas	82

1.7	Objetivo	83
1.7.1	Objetivo general	83
1.7.2	Objetivos específicos	83
II.	Método	84
2.1	Diseño de investigación	84
2.1.1	Método de investigación	84
2.1.2	Tipo de investigación	84
2.1.3	Nivel de investigación	84
2.1.4	Diseño de la investigación	85
2.2	Variables, operacionalización	86
2.2.1	Variables	86
2.2.2	Operacionalización de las variables	87
2.3	Población y muestra	89
2.3.1	Población	89
2.3.2	Muestra	89
2.3.3	Muestreo	89
2.4	Técnica e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	90
2.4.1	Técnicas de recolección de datos	90
2.4.2	Instrumentos de recolección de datos	90
2.4.3	Validez	91
2.4.4	Confiabilidad	93
2.5	Métodos de análisis de datos	94
2.6	Aspectos éticos	94
III.	Resultados	95
3.1	Descripción de la zona estudio	95
3.2	Recopilación de información y análisis de datos: Pre Prueba	97
3.3	Procedimientos para implementar un sistema	104
3.4	Características de los sensores de monitoreo	106
3.5	Generación de mapas de riesgos	109
3.6	Recopilación de información y análisis de datos: Pos Prueba	111
3.7	Implementación de un Sistema de Monitoreo Geotécnico Integral	118
IV.	Discusión	119
4.1	Discusión 1	119
4.2	Discusión 2	120
4.3	Discusión 3	121
4.4	Discusión 4	121

V. Conclusiones	123
5.1 Conclusión 1	123
5.2 Conclusión 2	123
5.3 Conclusión 3	123
5.4 Conclusión 4	124
VI. Recomendaciones	125
6.1 Recomendación 1	125
6.2 Recomendación 2	125
6.3 Recomendación 3	125
6.4 Recomendación 4	126
6.5 Recomendación 5	126
VII. Referencias bibliográficas	127
Anexos:	131
Anexo A. Instrumentos	131
Anexo B. Validación de instrumentos	138
Anexo C. Matriz de consistencia	139
Anexo D. Plano de instrumentación y registro fotográfico	141
Anexo E. Arquitectura del sistema implementado	143

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1:</b> Instrumentos utilizados y sus aplicaciones en el monitoreo	22
<b>Tabla 1.2:</b> Umbrales de alertas	46
<b>Tabla 1.3:</b> Criterios de alertas geotécnicas en el tajo	47
<b>Tabla 1.4:</b> Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación	54
<b>Tabla 1.5:</b> Valores de cohesión y ángulo de fricción de algunas rocas	56
<b>Tabla 1.6:</b> Tipos de discontinuidades	65
<b>Tabla 1.7:</b> Criterios de rotura	70
<b>Tabla 1.8:</b> Resistencia de la roca, cohesión y ángulo de fricción	72
<b>Tabla 1.9:</b> Grado de resistencia de la roca	76
<b>Tabla 1.10:</b> Discontinuidad	76
<b>Tabla 1.11:</b> Espaciamiento	76
<b>Tabla 1.12:</b> Persistencia	76
<b>Tabla 1.13:</b> Agua	77
<b>Tabla 1.14:</b> Relleno	77
<b>Tabla 1.15:</b> Rugosidad	77
<b>Tabla 2.1:</b> Recolección de datos, mediante técnicas e instrumentos	91
<b>Tabla 2.2:</b> Rango de validación de expertos	92
<b>Tabla 3.1:</b> Sensores utilizados en la etapa pre prueba de la investigación	103
<b>Tabla 3.2:</b> Resultados del indicador estrategias de monitoreo	104
<b>Tabla 3.3:</b> Resultados del indicador sistemas de comunicación	105
<b>Tabla 3.4:</b> Resultados del indicador criterios para la ubicación de los instrumentos	105
<b>Tabla 3.5:</b> Resultados del indicador características de los sensores de monitoreo	106
<b>Tabla 3.6:</b> Resultados del indicador tipos de sensores de monitoreo	107
<b>Tabla 3.7:</b> Resultados del indicador técnicas de monitoreo	107
<b>Tabla 3.8:</b> Resultados del indicador módulos del sistema	109
<b>Tabla 3.9:</b> Resultados del indicador umbrales de monitoreo	110
<b>Tabla 3.10:</b> Resultados del indicador mapas de riesgos	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Reporte de accidentes mortales en las minas del Perú.	6
<b>Figura 1.2:</b> Mega deslizamiento registrado en la mina Bingham Canyon.	7
<b>Figura 1.3:</b> Perfil de la zona del deslizamiento y camiones sepultados.	7
<b>Figura 1.4:</b> Física I. Gráfica de desplazamiento, velocidad y aceleración.	17
<b>Figura 1.5:</b> Desplazamiento acumulado vs tiempo	18
<b>Figura 1.6:</b> Desplazamiento incremental vs tiempo	19
<b>Figura 1.7:</b> Velocidades media, instantánea e incremental	21
<b>Figura 1.8:</b> Forma de medición del radar satelital	24
<b>Figura 1.9:</b> Imagen de Lima, desplazamientos de enero 2015 a julio 2016	25
<b>Figura 1.10:</b> Tecnologías de radar terrestre SAR - RAR	26
<b>Figura 1.11:</b> Monitoreo de bancos con el radar SAR	27
<b>Figura 1.12:</b> Radar móvil SAR	28
<b>Figura 1.13:</b> Mapa de riesgos y alertas generadas por el radar terrestre.	28
<b>Figura 1.14:</b> Sistema de monitoreo con radares SAR e InSAR.	29
<b>Figura 1.15:</b> Datos registrados por las estaciones totales	30
<b>Figura 1.16:</b> Flujo de trabajo con las estaciones totales	32
<b>Figura 1.17:</b> Complementariedad de tecnologías radar y estaciones totales.	33
<b>Figura 1.18:</b> Diagrama de monitoreo con GNSS / GPS.	34
<b>Figura 1.19:</b> Extensómetro digital.	35
<b>Figura 1.20:</b> Estación meteorológica digital	37
<b>Figura 1.21:</b> Técnicas de caracterización y monitoreo.	37
<b>Figura 1.22:</b> Métodos más utilizados para los sistemas de monitoreo	38
<b>Figura 1.23:</b> Esquema de integración de sensores de monitoreo.	39
<b>Figura 1.24:</b> Interfaces de los módulos móviles del sistema de monitoreo	40
<b>Figura 1.25:</b> Interfaz de distribución de todos los sensores de monitoreo.	41
<b>Figura 1.26:</b> Gráficas de las variables de control.	42
<b>Figura 1.27:</b> Matriz de estadística descriptiva.	43
<b>Figura 1.28:</b> Gráficas de correlación y sensibilidad de datos de instrumentos.	44
<b>Figura 1.29:</b> Histograma.	44
<b>Figura 1.30:</b> Gráficas escaladas de varios instrumentos.	45
<b>Figura 1.31:</b> Condiciones de desplazamientos	46
<b>Figura 1.32:</b> Realidad aumentada para visualización de instrumentos.	48
<b>Figura 1.33:</b> Realidad virtual control de tránsito en mina	48
<b>Figura 1.34:</b> Sala de control de monitoreo	49
<b>Figura 1.35:</b> Gráfica de ladera y talud	51

<b>Figura 1.36:</b> Origen geológico de las rocas	52
<b>Figura 1.37:</b> Esfuerzos a los que son sometidos los testigos en laboratorio	56
<b>Figura 1.38:</b> Diagrama de la cámara para ensayos triaxiales.	58
<b>Figura 1.39:</b> Grafica de las curvas de esfuerzo-deformación.	59
<b>Figura 1.40:</b> Rotura por esfuerzo cortante de un talud.	60
<b>Figura 1.41:</b> Modelo de comportamiento tensión-deformación.	61
<b>Figura 1.42:</b> Comportamiento tensión-deformación.	61
<b>Figura 1.43:</b> Ley de Hooke: Deformación elástica – plástica.	62
<b>Figura 1.44:</b> Comportamiento elástico y plástico.	62
<b>Figura 1.45:</b> Comparación entre esfuerzo deformación y resistencia	63
<b>Figura 1.46:</b> Envoltentes de Mohr-Coulomb, tangenciales y normales	64
<b>Figura 1.47:</b> Envoltentes de rotura de Hoek and Brown aplicado a la roca	64
<b>Figura 1.48:</b> Características de las discontinuidades	66
<b>Figura 1.49:</b> Gráfica de corte de discontinuidades planas	67
<b>Figura 1.50:</b> Dilatancia	67
<b>Figura 1.51:</b> Gráfica de deslizamiento sobre un plano inclinado	68
<b>Figura 1.52:</b> Perfiles de Barton y Choubey.	69
<b>Figura 1.53:</b> Criterios de falla para los macizos rocosos	72
<b>Figura 1.54:</b> Tipos de rotura	73
<b>Figura 1.55:</b> Métodos de análisis de estabilidad de taludes	74
<b>Figura 1.56:</b> Mapa conceptual de las funciones de Excel	78
<b>Figura 1.57:</b> Diagrama de funcionalidad del sistema de monitoreo integral	78
<b>Figura 3.1:</b> Sectores del tajo	95
<b>Figura 3.2:</b> Radar IBIS Rover	97
<b>Figura 3.3:</b> Datos registrados por el radar IBIS Rover	98
<b>Figura 3.4:</b> Datos registrados por las estaciones totales robotizadas y GeoMoS	99
<b>Figura 3.5:</b> Información estadística de las mediciones con estaciones totales	100
<b>Figura 3.6:</b> Datos registrados y procesados de los piezómetros	101
<b>Figura 3.7:</b> Datos y procesados de las estaciones meteorológicas	102
<b>Figura 3.8:</b> Diagrama de integración del sistema de monitoreo integral	111
<b>Figura 3.9:</b> Mapa 2D de integración de todos los sensores	112
<b>Figura 3.10:</b> Resultados mediante graficas estadísticas y series temporales	112
<b>Figura 3.11:</b> Resultados de series temporales de desplazamientos, velocidades	113
<b>Figura 3.12:</b> Resultados estadísticos de los sensores seleccionados en el mapa	113
<b>Figura 3.13:</b> Resultados del análisis de estabilidad por métodos probabilísticos	114
<b>Figura 3.14:</b> Dispositivos móviles para el registro de datos de campo	115
<b>Figura 3.15:</b> Interfaz donde se ingresan los umbrales de monitoreo	115

<b>Figura 3.16:</b> Mapa de riesgo de acuerdo a umbrales definidos	116
<b>Figura 3.17:</b> Desde cualquier móvil conectado se ven mapas de riesgos	116
<b>Figura 3.18:</b> Generación de reportes automáticos en minutos	117
<b>Figura 3.19:</b> Sala de control de monitoreo 24 X 7.	117
<b>Figura 3.20:</b> Esquema de integración y gestión de monitoreo eficiente.	118
<b>Figura 8.1:</b> Plano de instrumentación	141
<b>Figura 8.2:</b> Registro de equipos de monitoreo en mina.	142
<b>Figura 8.3:</b> Arquitectura del sistema de monitoreo geotécnico integral.	143

## RESUMEN

Implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de taludes en la mina Antapaccay, región Cusco, 2017, es el título de la investigación que tuvo como objetivo integrar los datos de los sensores de monitoreo como radares, estaciones totales, piezómetros, estaciones meteorológicas, entre otros, con la finalidad de centralizarlos en una sola base de datos procesarlos y analizarlos.

El diseño de la investigación fue cuasi experimental de tipo aplicada, la población estuvo conformada por el monitoreo a los 15 bancos del tajo abierto de la mina y su muestra fue considerada igual a la población ya que se requería controlar todos los taludes. Para el procesamiento de los datos en la etapa pre prueba se emplearon los programas propios de algunos equipos y para otros instrumentos se realizó el procesamiento manual con el software Microsoft Excel; mientras que en la etapa pos prueba se emplearon los módulos del sistema integrador SHMS.

Los resultados obtenidos permitieron arribar a las conclusiones del estudio logrando determinar que la implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral en un servidor WEB externo, permitió procesar automáticamente los datos de los sensores, generando los mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes automáticos, mejorando así el tiempo de la generación de los resultados de días a minutos, cumpliéndose de manera precisa y eficiente con el monitoreo integral que exige el Ministerio de Energía y Minas mediante el D.S. 024-2016-EM.

**Palabras claves:** Sistema, monitoreo, sensores, desplazamiento, riesgos.

## ABSTRACT

Implementation of the system of geotechnical integral monitoring to evaluate the behavior of banks in the mine Antapaccay, region Cusco, 2017, is the title of the investigation that had as aim integrate the information of the sensors of monitoring like radars, total stations, piezómetros, meteorological stations, between others, with the purpose of centralizing them in an alone database.

The design of the investigation was cuasi experimentally of type applied, the population was shaped by 15 banks of the slit opened of the mine and its sample was considered to be equal to the population since it is needed to monitor all the banks; for the processing of the information in the stage pre test there were used the own programs of some equipments and for other instruments the manual processing realized with the software Microsoft Excel; whereas in the stage pos test there were used the modules of the system SHMS.

The obtained results allowed to arrive at the conclusions of the study managing to determine that the implementation of the system of geotechnical integral monitoring, it allows to process automatically the information of the sensors, generating real time the maps of risks, early alerts and automatic reports, improving this way the time of the generation of the results from days to minutes, being fulfilled in a precise and efficient way by the integral monitoring that demands the Department of Energy and Mines by means of the D.S. 024-2016-EM.

**Key words: System, monitoring, sensors, displacement, risks.**

## **I. INTRODUCCIÓN**

## **I. Introducción**

Los deslizamientos ocasionan millones de dólares en daños y pérdidas a las operaciones mineras, debido a la presencia de factores desencadenantes que predominan el equilibrio de los taludes de los macizos rocosos, los cuales someten a las operaciones mineras a riesgos altos.

Asimismo, la presencia de discontinuidades o fallas en los macizos rocosos, generan que sus propiedades físicas y mecánicas sean anisótropas, heterogéneas y discontinuas, permitiendo que las fuerzas ejercidas den lugar a cambios en su condición mecánica de las rocas, produciendo una serie de consecuencias internas, como la transformación de su estado tensional, deformaciones y desplazamientos.

Del mismo modo el diseño de los taludes se basa en la determinación del factor de seguridad, mediante el cual es imposible tener 100% de certeza sobre todos los parámetros geotécnicos de un macizo rocoso y aún más respecto a los esfuerzos que actuarán en diversas etapas de la vida de una mina.

Es por estas razones, que actualmente, las entidades fiscalizadoras del Estado y las compañías auditoras exigen a las mineras, la instalación de más sensores y programas de monitorización que permitan proporcionar información del comportamiento de los taludes, detectando tempranamente probabilidades de falla e inestabilidad, evitando que los potenciales colapsos ocasionen víctimas mortales y pérdidas económicas.

De acuerdo a las nuevas exigencias un gran problema es procesar y analizar los datos generados por los sensores, debido a su gran cantidad de datos, la elevada frecuencia de lecturas y los diferentes estándares de comunicación que causan la descentralización de los datos, no pudiendo generar información relevante, rápida y eficiente.

Esta investigación tiene como objetivo principal brindar la solución mediante el establecimiento de un sistema de monitoreo geotécnico integral, el cual permite incorporar a una sola base de datos, todos los datos de los sensores de monitoreo, procesarlos y extraer información notable para la toma de decisiones.

Los datos de monitoreo del tajo de la mina fueron proporcionados por el personal de la mina, integrándose así los datos de los sensores radares, estaciones totales robotizadas, piezómetros y estaciones meteorológicas, en un único servidor WEB externo logrando monitorear todos los taludes de la mina.

Además de integrar los sensores de monitoreo también se ha implementado un módulo para integrar los sensores manuales y permitir gestionar de forma inteligente el seguimiento de todas las actividades de monitoreo e inspección de las estructuras y activos relacionados a diversas áreas de la mina.

Igualmente con los otros módulos del sistema se puede procesar el análisis estadístico descriptivo y probabilístico de eventos futuros; visualizar los datos de monitoreo en planos 2D y 3D; generar los mapas de riesgos; generar las alertas tempranas y reportes automáticos.

Con los datos integrados en una sola base de datos, se pueden conocer las variables de control de las propiedades mecánicas del macizo rocoso como son los desplazamientos, velocidades y aceleraciones, permitiendo analizar e interpretar el comportamiento de los taludes, para identificar las zonas inestables, pronosticar el tiempo de colapso y el potencial trayecto de la falla.

De esta manera se debe establecer las medidas de estabilidad, con la finalidad de tener el riesgo vigilado durante la vida del proyecto minero, no dañando a los equipos y a los trabajadores de la mina, con lo cual se reducen los costos, se procesa mayor volumen de mineral, se hace una explotación sostenible durante la vida de la mina garantizando los planes de minado y sobre todo se mejora la seguridad en la operación minera.

Este trabajo de investigación se compone de siete capítulos, siendo el primero la introducción, en la cual se presenta la realidad problemática; los antecedentes internacionales y nacionales que presentan información sobre las variables de la investigación; las teorías relacionadas al tema, presentan basta información sobre el conocimiento de las variables las cuales han sido tomadas de bibliografías que son referentes a nivel internacional; la formulación al problema, presenta un problema general y tres específicos; este estudio se justifica de manera teórica, practica, metodológica, económica, segura y social;

hipótesis presenta una general y tres específicas siendo estas pseudo hipótesis ya que no serán contrastadas por el tipo de investigación; objetivos se presenta uno general y tres específicos. El segundo capítulo da cuenta del método de la investigación, indicando el tipo, nivel y diseño; también indica las variables y la operacionalización de las mismas; la población y muestra que en este caso serán iguales; se presenta los sensores y técnicas de captura de datos, validez y confiabilidad. El tercer apartado presenta los resultados, los cuales se dan en dos etapas, la primera pre prueba en la cual se recolectan y procesan los datos de manera manual y la segunda pos prueba, donde se recolectan y procesan los datos con el sistema de monitoreo integral. El cuarto capítulo corresponde a presentar las discusiones de los resultados. La quinta parte presenta las conclusiones de este trabajo. El sexto capítulo corresponde a las recomendaciones del trabajo. El séptimo capítulo presenta las referencias bibliográficas empleadas en esta investigación y por último se muestran los anexos correspondientes.

## 1.1 Realidad problemática

Actualmente se vienen presentando una sucesión de accidentes mortales en varias operaciones mineras del Mundo, debido principalmente a que se exige a los mineros, incrementar el ángulo de los bancos de los taludes, para extraer el mayor mineral posible, causando el desequilibrio de los taludes, por lo tanto, es imprescindible disponer de sistemas de auscultación y vigilancia permanente, que permitan detectar tempranamente inestabilidades en los tajos mineros, evitando que los potenciales deslizamientos ocasionen víctimas mortales y pérdidas económicas, tanto en minas a nivel internacional y nacional.

Según la Dirección General de Minería, en el Perú desde el año 2000 hasta el 02 de Junio de 2017, se han reportado 951 accidentes mineros mortales de los cuales el 38% corresponden a defectos geomecánicos o geotécnicos (Ver figura 01). En respuesta a este tipo de problemas el Ministerio de Energía y Minas el 28 de Julio de 2016 promulgo el Decreto Supremo N° 024-2016-EM, el cual exige que las empresas mineras del país, ejecuten obligatoriamente medidas de seguridad y salud ocupacional, que permitan estimar los riesgos, visualizar los peligros y ejecutar los controles establecidos, promoviendo una adecuada gestión y monitoreo de los taludes, lo cual permitirá detectar a tiempo los factores desencadenantes que causan los mecanismos de rotura o fallas en los macizos rocosos.

En la actualidad el diseño de los taludes se base principalmente en el análisis de estabilidad, mediante la determinación del factor de seguridad, el cual busca la condición de equilibrio de la superficie de rotura, por medio de métodos empíricos como la clasificación geomecánica, equilibrio límite y numéricos, no permitiendo ninguno de ellos tener 100% de certeza sobre el comportamiento y todos los parámetros geotécnicos del macizo rocoso, lo que genera incertidumbre y conlleva a aplicar probabilidades de falla, estas probabilidades indican que algo fallara en algún momento, por lo que es indispensable prevenir mediante el monitoreo continuo de la estructura.

Es por esta razón que la detección temprana de deformaciones en los macizos rocoso hoy en día se realiza mediante sensores de monitoreo manuales y automáticos, los cuales generan gran cantidad de datos; lo que es un problema ya

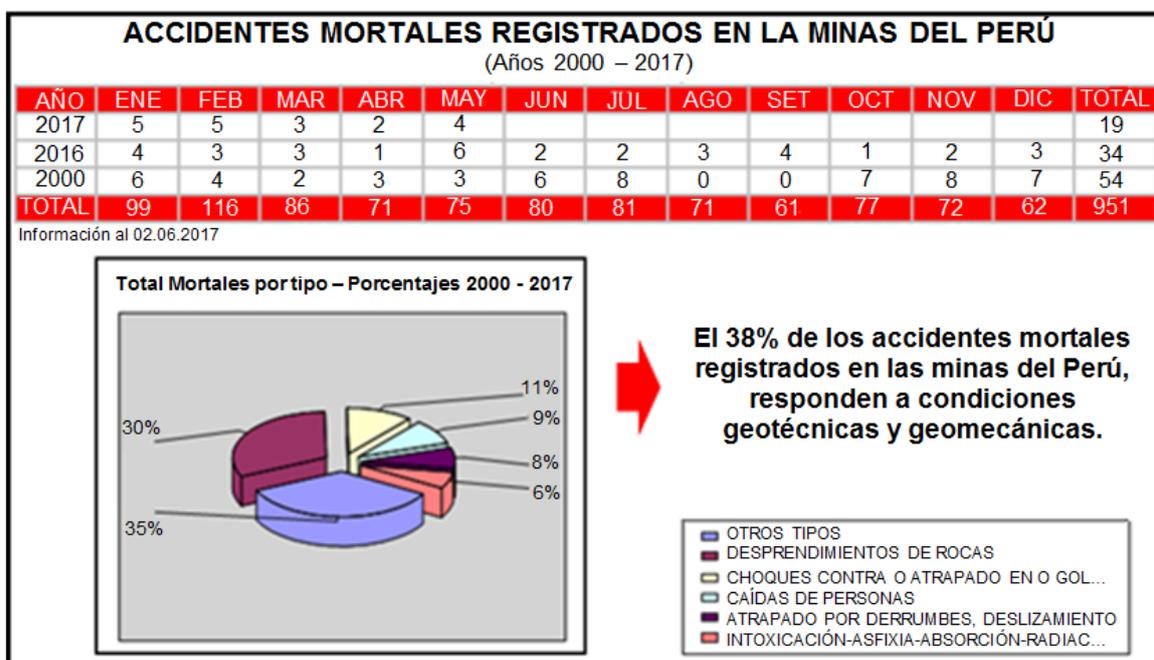
que los instrumentos están muy dispersos y es complicado su procesamiento, análisis e interpretación. Para esto los geotecnistas hoy en día buscan obtener información para la mejor toma de decisiones en tiempo real, mediante el empleo de sistemas de monitoreo geotécnico integral.

Por lo expuesto, Química Suiza Industrial del Perú S.A., desde el año 2000 viene implementando en los principales proyectos mineros del Perú diversas tecnologías de monitoreo de alta precisión y calidad, así como los servicios de soporte y mantenimiento anuales que aseguran el empleo correcto y continuo de los sistemas y sensores de auscultación. Mediante su Sección de Monitoreo Geotécnico, ha implementado cientos de instrumentos por los que es el líder en el mercado nacional, siendo representante de las principales compañías que trabajan en estas tecnologías como: TRE Altamira, desarrolla estudios satelitales de radar InSAR en grandes extensiones de terreno; IDS Georadar, provee los radares terrestres de apertura sintética, Leica Geosystems, desarrolla los instrumentos de monitoreo como estaciones totales y GPS y World Sensing, desarrolla equipos de telemetría de largo alcance por radio frecuencia.

Las soluciones indicadas brindan un control de los taludes de las minas a tajo abierto; pero este control en muchos casos es muy trabajoso, debido a que los geotecnistas deben recolectar, limpiar, centralizar y procesar casi manualmente una gran cantidad de datos, ya que se encuentran dispersos en varios computadores.

Cabe precisar que la mina, se ubica en el distrito y provincia de Espinar, región Cusco. Las operaciones iniciaron en noviembre del 2012, siendo una mina de tipo Skarn - pórfido de cobre. El área total del proyecto es de 3,225 ha. teniendo reservas comprobadas de 720 millones de toneladas de mineral con una ley de cobre de 0.56%. Se ha calculado que producción de la mina será al año 160,000 toneladas de concentrado de cobre y como subproductos contenidos de oro y plata. Entre los años 2012 y 2017, se han presentado en el tajo de la mina algunos deslizamientos en los taludes, como consecuencia que el macizo rocoso presenta comportamientos dúctiles, no siendo muy competente a la resistencia al corte, además presenta discontinuidades y fallas regionales, así como un nivel freático cerca de la superficie y mucho material aluvial, también se presentan

precipitaciones en los meses de verano las cuales varían entre los 700 a 1000 mm por año, las heladas registradas en los meses de invierno pueden durar entre 20 a 30 días, por lo que Química Suiza Industrial del Perú S.A. mediante el contrato del plan de soporte y mantenimiento anual de los sensores de monitoreo de la mina y el autor de este trabajo de investigación, solicitaron al personal de geotecnia de la mina, los datos de monitoreo de los sensores, con la finalidad de mostrarles en un servidor WEB externo la implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral, que permitió centralizar todos los datos de los sensores en una sola base de datos, desde donde se procesa, analiza y genera la información estadística, probabilística, correlación de datos entre diversos sensores, así como la generación de los mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes automáticos, que permiten evaluar el comportamiento de los taludes de la mina.



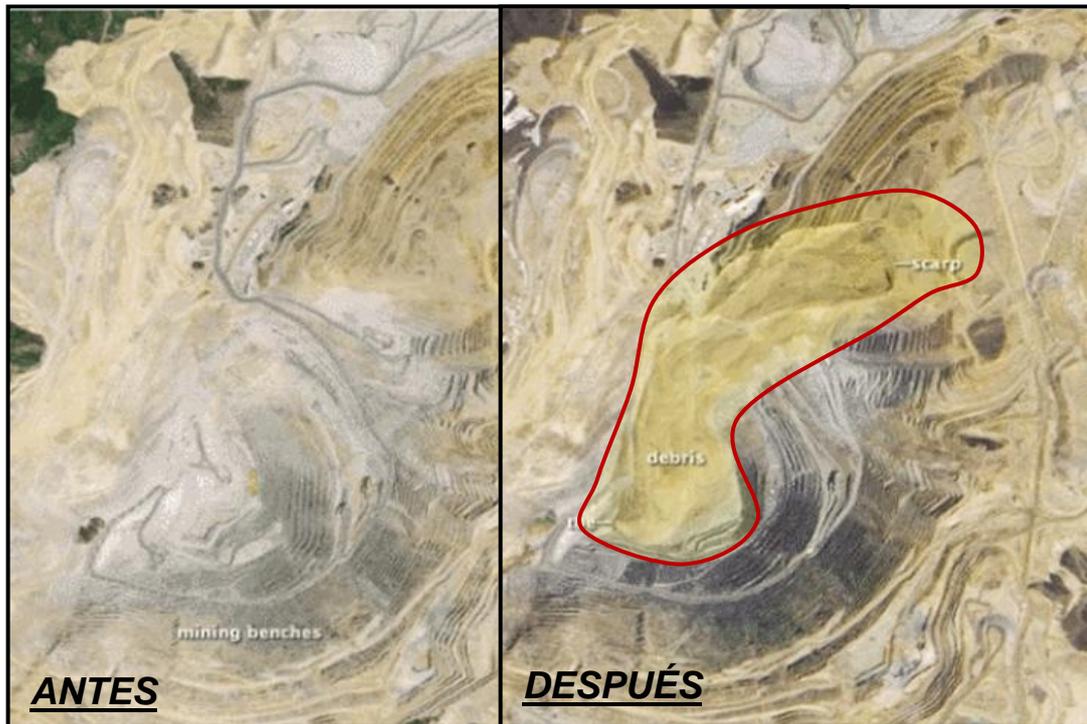
Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Junio de 2017.

**Figura 1.1:** Reporte de accidentes mortales en las minas del Perú.

Por otro lado, en la mina Bingham Canyon, Utah, Estados Unidos, el 11 de abril de 2013, se registró el más grande deslizamiento, aproximadamente 100 millones de toneladas de material se deslizaron.

Los sensores de monitoreo detectaron el evento en el mes de febrero donde se registraron velocidades de 2mm/día, mientras que al momento del evento se

registraron velocidades de 5 cm/día. Se presentaron pérdidas materiales de camiones de transporte de material.



Fuente: IDS

**Figura 1.2:** Mega deslizamiento registrado en la mina Bingham Canyon.



Fuente: IDS Georadar

**Figura 1.3:** Perfil de la zona del deslizamiento y camiones sepultados.

## 1.2 Trabajos previos

Este trabajo ha incluido un grupo de investigaciones nacionales e internacionales elegidas por el autor, para que faciliten los conocimientos vinculados a las variables de esta investigación, las cuales detallan en forma clara y concreta el problema de estudio. Entre la selección de estudios tenemos:

### 1.2.1 Internacionales

En el estudio internacional de **Jerez, Carlos** (2009), sobre el: Modelo de monitoreo de asentamientos en las explanadas de la vía Tosagua-Chone, en los humedales y zonas inundables para estabilizar la obra geotécnica de la vía. Tesis (Magister en vías terrestres). Ambato : Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Centro de Estudios de Posgrado, 2009. 114 p., se presenta como: Nivel de la Investigación: Exploratoria. Diseño de la Investigación. Experimental. Siendo su Población: Los humedales y los terraplenes del Proyecto de Reconstrucción de la vía Tosagua-Chone y su muestra: Seis puntos de referencia los cuales son monitoreados con piezómetros, inclinómetros y asentómetros. Las Variables trabajadas son: Modelo de monitoreo de asentamientos y Estabilización de la obra geotécnica. Su objetivo era elaborar el plan o modelo de monitoreo de los asentamientos de los rellenos de los caminos, en las explanadas de los humedales y zonas inundables de la vía Tosagua-Chone.

Finalmente, se determina que los asentómetros artesanales, así como los piezómetros e inclinómetros, garantizan los resultados obtenidos con tecnología de última generación. La colocación de instrumentos geotécnicos en la construcción y/o reconstrucción de vías, permite evaluar decisiones más precisas y eficientes sobre las superestructuras de pavimento y obras complementarias. Esta tesis ha sido importante para esta investigación, ya que presenta la metodología para la instalación de equipos: asentómetros (asentamientos), los inclinómetros (deformaciones internas) y piezómetros (presión de agua), que brindaran datos de monitoreo en el tiempo.

En el estudio internacional de **Vázquez, Alfredo** (2013), sobre la: Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo. Tesis (Ingeniería Civil). Cuenca : Universidad de Cuenca, Facultad de

Ingeniería Civil, 2013. 129 p., se presenta como Nivel de la investigación: Explicativa, Tipo de Investigación. Aplicada, siendo la Población la ciudad de Cuenca y su muestra: una zona inestable activada. Este estudio tiene como objetivo general el uso de los métodos geofísicos y técnicas de monitoreo en el análisis de deslizamientos y su aplicación en los deslizamientos locales y regionales.

Finalmente, se concluye que la auscultación, brinda información de la dinámica del movimiento, para ser empleada en el análisis de la efectividad de las medidas de mitigación que se desarrollen. El monitoreo debe recopilar datos en tiempo real, con la finalidad de colocar un Sistema de Alerta Temprana (SAT) para prevenir pérdidas materiales y humanas. Esta tesis ha sido muy valiosa para esta investigación, porque ha brindado información de las dos variables propuestas en este estudio, también brinda información sobre las diversas técnicas de monitoreo y prospección geofísica.

En el estudio internacional de **Cruces, Hernaldo** (2014), sobre la: Instrumentación geotécnica para el mejoramiento de la seguridad en taludes de rípios división Radomiro Tomic CODELCO Chile. Tesis (Ingeniero Civil Industrial en Minas). Antofagasta : Universidad de Antofagasta, Facultad de Ingeniería, 2014. 102 p., se presenta como: Diseño de la investigación: Experimental. Tipo de la Investigación: Aplicada. Considerándose como Población los taludes de la mina y como muestra: Los taludes del botadero OBL y el botadero de rípio fase VII. El objetivo general de la investigación es implementar los dos instrumentos de monitoreo más empleados en la minería con la finalidad de monitorear las deformación que se presentan en los taludes de los botaderos de rípios, formando parte de las medidas de contingencia y seguridad en mina.

Finalmente, se determina que para este caso se requiere contar con los instrumentos apropiados, para conseguir los datos de monitoreo, los cuales deben anticipar situaciones críticas, para ejecutar controles de mitigación, para dar mayor seguridad al personal y los procesos que se generan en los botaderos. Los productos alcanzados justifican el uso de los sensores de auscultación superficial de taludes aplicados a los botaderos. Los radares y estaciones totales robotizadas empleados tienen la capacidad de adquirir mediciones en tiempo real

y conseguir la topografía sintética del sector y ubicación del botadero OBL y botadero de ripio fase VII. Esta investigación ha sido la más importante para este estudio, porque ha brindado datos de las dos variables que se han empleado en el estudio, así como se han determinado los criterios para la obtención de los sensores de monitoreo más empleados en el mundo.

### **1.2.2 Nacionales**

En la investigación de **Pacheco, Arturo** (2006), sobre la: Estabilización del talud de la Costa Verde en la zona distrito de San Isidro. Tesis (Ingeniero Civil). Lima : Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2006. 88 p., se presenta como: Método cuantitativo de corte transversal. Tipo de la Investigación. Aplicada. Nivel de la investigación. Descriptiva. El estudio tiene como población: Los taludes de la Costa Verde, siendo su muestra. Los taludes de la Costa Verde del sector de San Isidro. El objetivo general del estudio es analizar el problema, presentar alternativas de solución y el diseño de ingeniería para un tramo de 500 m de los taludes de la Costa Verde en el sector de San Isidro.

Finalmente, por motivos económicos, de facilidad de proceso constructivo y de impacto ambiental, se recomienda como solución para el problema de estabilidad del talud de la Costa Verde en el Distrito de San Isidro el empleo de los muros ASTM C915 (Crib Walls). Este estudio fue de suma importancia para esta investigación, porque plantea un análisis comparativo entre las soluciones planteadas para determinar en base a parámetros técnicos y económicos la estabilización de taludes.

En el estudio de **Rodriguez, Morales y Paredes** (2003), sobre la: Evaluación de la estabilidad de taludes en la mina Lourdes. Tesis (Ingeniero de minas). Tacna : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Facultad de Ingeniería de Minas, 2003. 85 p., se presenta como Diseño: Experimental. Tipo de Investigación. Aplicada. Se aplica a la Población: Los taludes de la Mina Lourdes, siendo la Muestra. Los taludes de las canteras Mario y Lourdes. El objetivo general propone que se realicen las evaluaciones de campo, de laboratorio y de gabinete para determinar los parámetros geomecánicos de las estructuras presentes en el área de la explotación de la mina Lourdes.

Finalmente, se determinó que el análisis de estabilidad, se desarrolle utilizando el método de equilibrio límite. Se registró datos estructurales; determinándose como el sistema de discontinuidades más desfavorable, en la cantera MARIO, por lo que se determinó para una altura de 60 m, un análisis de estabilidad para una condición de máximo equilibrio, generando un factor de seguridad de 2.13, entre las fuerzas desestabilizadoras y resistentes, por lo que se estableció la estabilidad de los bancos de la cantera en la pared sur. Por otro lado con la información estructural se determinó el sistema de discontinuidades más desfavorable, en la cantera LOURDES, al Sistema Fractura "B", hacia la cara libre del talud final, se configuro el riesgo potencial de una inestabilidad por falla a la resistencia de corte plana, obteniéndose un Factor de Seguridad de 3.75, lo que manifiesta la estabilidad de diseño para los bancos Sur. Es muy clara la diferencia entre los Factores de Seguridad, por lo que se puede indicar que existe diferencias entre la calidad de los materiales evaluados. Este estudio es de relevada importancia para esta investigación, ya que brinda la metodología de evaluación de la estabilidad de los macizos rocosos, mediante el método empírico y equilibrio limite, base para el desarrollo de la variable comportamiento de taludes del presente trabajo.

En la investigación de **Morales, Dante** (2000), sobre el: Análisis y diseño de taludes Mediante Métodos Computacionales. Tesis (Maestro en Ciencias con mención en Ingeniero de minas). Lima : Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Sección de postgrado (Lima), 2000. 128 p., se presenta como Método cuantitativo de corte transversal. Tipo de Investigación: Aplicada. Nivel de la investigación: Descriptiva. Siendo la Población de esta investigación: Las minas del Perú y su muestra: Algunas minas como Toquepala, Cuajone, Cerro Verde, Yanacocha. El objetivo general de la tesis consiste en realizar una evaluación teórica de la estabilidad de taludes con el propósito de conseguir un talud final económico y seguro, por medio de investigaciones de campo, análisis de laboratorio, evaluaciones técnicas, un programa de control en el terreno y experimentación a escala natural.

Finalmente, se determino que el modelo de gestión de taludes, es el más apropiado para mitigar los colapsos de taludes en las operaciones mineras superficiales, reduciendo los costos en obras civiles, altos costos sociales, las

pérdida de humanas por riesgos geotécnicos y geodinámicos como deformaciones y deslizamientos de rocas y suelos. La aplicación del modelo de gestión de taludes, logra el diseño óptimo de los taludes en suelo y rocas, ya que funciona como un sistema retroalimentador generando su propia respuesta al comportamiento de los taludes. Se puede calcular un punto de colapso en los taludes de las zonas inestables mediante el algoritmo de monitoreo que se aplica a cualquier explotación superficial. El monitoreo en los sectores inestables permite un diseño óptimo para la operación minera, previniendo fallas o colapsos. Esta tesis ha sido muy importante para esta investigación, ya que contiene las dos variables que se han desarrollado en el trabajo, además presenta un programa o modelo computacional que se aplica en diversas minas del Perú.

## **1.3 Teorías relacionadas al tema**

### **1.3.1 Sistema de monitoreo geotécnico integral**

El desarrollo del marco teórico de la variable independiente de esta investigación se ha basado en el estudio de diversas fuentes bibliográficas, que han permitido definir lo siguiente:

Un conjunto de subsistemas, conforman un sistema de monitoreo constante, el cual proporciona información sobre el estado de las estructuras, permitiendo evaluar su integridad y seguridad, con la finalidad de tomar decisiones y acciones que la lleven a una situación segura (Olivares, 2012, p.12).

Un procedimiento de monitoreo busca conocer de manera más detallada el comportamiento de los taludes a lo largo del tiempo para medir parámetros geotécnicos que rigen el mecanismo de falla (Suarez, 2009, p.497).

Para realizar un diseño y evaluar los riesgos con la finalidad de minimizarlos se debe contar con una herramienta de monitoreo, es por esta razón que en la actualidad las compañías mineras están obligadas moralmente y financieramente a erradicar los probables accidentes ya que tienen la obligación legal de proteger a sus trabajadores. La legislación indica que los empleadores deben tener un ambiente de trabajo seguro. Las multas, encarcelamiento o ambos presentados en las minas se deben principalmente a la falta de identificación de los peligros y sus riesgos. La auscultación no solo identifica los sectores de riesgo, sino también disminuye la preocupación de los trabajadores ya que saben que las condiciones del terreno están siendo supervisadas siempre (Read y Stacey, 2009, p.342).

Este estudio tiene en cuenta que: un sistema de monitoreo integral, es un grupo de módulos que se vinculan para permitir la centralización e integración de los instrumentos de monitoreo, proporcionando mediciones sistemáticas repetitivas de una posición o sector, considerándose un monitoreo casi en tiempo real si las medidas son más continuas, permitiendo la generación de alertas tempranas para minimizar los riesgos y deslizamientos potenciales que originan pérdidas materiales y humanas (SafeLand, 2012).

### **1.3.1.1 Procedimientos para implementar un sistema de monitoreo integral**

La implementación de un sistema de monitoreo integral, se debe realizar con el establecimiento de procedimientos que permitan planificar desde los objetivos hasta el uso de los datos (Cruces, 2014, p.70). Esta investigación considera establece los siguientes procedimientos:

#### **✓ Estrategias de monitoreo**

En esta etapa se deben verificar el diseño de bancos, los sectores de riesgos y los mecanismos de fallas, mediante la revisión de estudios existentes de análisis y diseños de taludes, mapas y ensayos de laboratorio. En caso no exista la información geotécnica, se recomienda emplear los estudios históricos satelitales InSAR, los cuales permiten detectar regionalmente zonas inestables con precisión milimétrica, sobre las cuales se colocaran sensores de monitoreo que permitan auscultar puntualmente el comportamiento de los taludes (Cruces, 2014, p.71). También en esta fase los geotecnistas o especialistas de monitoreo respondieron las siguientes interrogantes:

- ¿Cuál es el propósito de implementar los sensores y sistemas de monitoreo?  
Medir el comportamiento de los taludes para contar con un diseño conservador, seguro, estable y confiable para el personal, equipos y producción.
- ¿Cuáles son los parámetros que se requieren valorar?  
Los parámetros a valorar o medir son: aceleraciones, velocidades, desplazamientos, tendencias, niveles freáticos y parámetros climatológicos.
- ¿Cuál es el comportamiento esperado después de realizar la primera medición?  
El comportamiento esperado en un periodo definido es la generación de desplazamientos acumulados, vectores resultantes y magnitudes, ya que no se respeta las restricciones geotécnicas debido al el tipo de material, presencia de agua y cambio de las condiciones climatológicas.
- ¿Cuál es el protocolo esperado, frente a desplazamientos o velocidades críticas por sobrepasar los límites o umbrales de alertas establecidas por los geotecnistas?

El protocolo crítico detectado por sobrepasar los umbrales máximos establecidos, involucra el cierre de un sector o de toda la mina, produciendo retrasos en el desarrollo del proyecto minero.

- ¿Cuáles son las precisiones de los sensores de monitoreo tolerables?  
Las dimensiones deseadas serán en centímetros y milímetros, estarán en función al sector definido, para cada sensor. Si es macro deformaciones serán centímetros y de micro deformaciones serán milímetros.
- ¿Cómo deben definirse las zonas para la instalación de los sensores?  
Se debe definirse en base a los mapas de riesgos elaborados por los geotecnistas, en base a estudios InSAR que permiten detectar zonas inestables o a zonas de interés establecidas por los geotecnistas.

✓ **Sistemas de comunicación**

Se debe establecer la transmisión de los datos de los sensores manuales y automatizados a una base de datos centralizada, considerándose que en un tajo abierto existen varios puntos de observación. Los sensores manuales cuando se encuentran muy distantes, para recolectar sus datos requieren de mucho tiempo y recursos, en este caso para estos equipos se recomienda contar con aplicaciones en dispositivos móviles que permitan realizar la colección de datos manera sistematizada con la finalidad de integrar estos datos a la base central; por otro lado existen sensores manuales como los piezómetros de cuerda vibrante que pueden conectarse a dataloggers que permiten enviar los datos mediante radio frecuencia a la base central. Por otro lado los sensores de medición continua, presentan ventajas operacionales de confiabilidad en los datos, por lo que es muy importante contar con un sistema de comunicación inalámbrica tipo WI-FI que es el más recomendable para la mina, permitiendo la transmisión de datos en tiempo real. Las técnicas son: fibra óptica, access point, módem, celulares y radio (Cruces, 2014, p.57).

✓ **Criterios para la ubicación de los instrumentos, parámetros a monitorear y parámetros de control para analizar los movimientos**

La distribución de los sensores o instrumentos de monitoreo en campo, debe estar en relación al comportamiento de los taludes, el método de manejar los datos, analizar la información y predecir futuros comportamientos de los taludes.

La ubicación de los hitos de control en los taludes del tajo abierto, deben ser elegidas de acuerdo a las condiciones del macizo rocoso, calidad del material y las condiciones del agua. En general, los criterios utilizados, para la ubicación de los sensores de monitoreo corresponden a (Cruces, 2014, p.83):

- Determinar calidad geotécnica mediante de las características geomecánicas del macizo rocoso, con la cual se determina la resistencia y dureza, el grado de fracturamiento (RQD), espaciamiento, continuidad, abertura, rugosidad, orientación y número de familias de separaciones, grado de alteración y condición del agua.
- Ubicar sectores con diseños agresivos, alturas inter-rampas sobre una altura agresiva y ángulos inter-rampas de mayor ángulo limite admisible.
- Determinar sectores de fallas mayores y de contacto geológico.
- Identificar los diferentes mecanismos de fallas como: planares, cuñas, fallas por volcamiento, zonas de caídas de rocas.
- Determinar las presiones de poros y la profundidad de los niveles agua subterránea.
- Identificar zonas de grandes deformaciones.
- Monitorear los factores climatológicos, tales como temperaturas extremas, lluvias, humedad relativa, etc.

En el caso del monitoreo de taludes del tajo abierto de la mina, los instrumentos o sensores deben considerar medir los siguientes parámetros (Cruces, 2014, p.74):

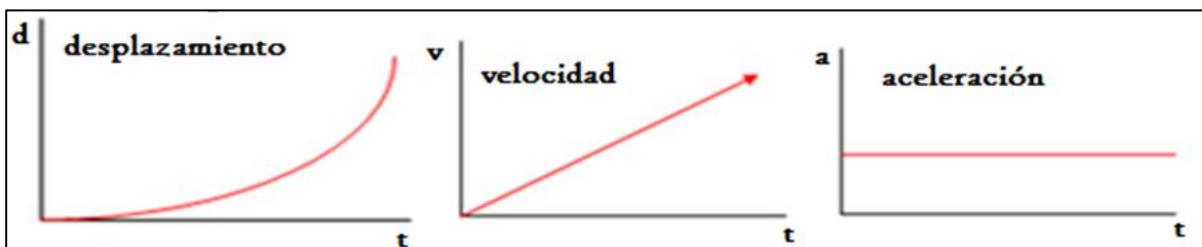
- Desplazamientos, velocidades y aceleraciones del macizo rocoso.
- Nivel freático del agua y presión de poros.
- Deformaciones del macizo rocoso.
- Control de zonas agrietadas.
- Monitoreo de voladuras.
- Activación de mecanismos de fallas como cuñas o bloques asociados.

Para medir los parámetros indicados con la finalidad de detectar movimientos en los taludes se emplean instrumentos geotécnicos como los radares, estaciones totales robotizadas, extensómetros entre otros, cada uno de estos sensores proporcionan datos de monitoreo. Los radares, estaciones totales robotizadas y escáner láser 3D registran desplazamientos tridimensionales; los

extensómetros registran desplazamientos unidimensionales; los inclinómetros registran la deformación interna de la falla y los piezómetros registra el nivel piezométrico y por ende la presión de poros.

Los datos capturados dependerán de los tipos de sensores de monitoreo en el caso de la estación total con prismas los datos capturados son coordenadas: este, norte, altura, distancia inclinada; en el caso de los radares y extensómetros son desplazamientos acumulados; en el caso de los piezómetros son niveles piezométricos y en el caso de las estaciones meteorológicas los parámetros climáticos como temperatura, humedad, precipitación; todos estos datos son procesados convirtiéndolos en desplazamientos, velocidades y aceleraciones (Paredes, 2013, p.45).

Los resultados obtenidos son aplicables a cualquier unidad de longitud pudiendo ser unidimensional, bidimensional y tridimensional. Para realizar los análisis de esta investigación se consideran los desplazamientos acumulados y velocidades incrementales (Paredes, 2013, p.46).



Fuente: (Leiva, 2009, p.73).

**Figura 1.4:** Física I. Gráfica de desplazamiento, velocidad y aceleración.

- **Desplazamiento acumulado:**

Es un criterio muy importante si se quiere realizar análisis por desplazamiento.

Cuando nos referimos al desplazamiento acumulado estamos hablando del desplazamiento que se originó desde el inicio hasta la última medida. Para calcular el desplazamiento acumulado se usa la Ecuación 01.

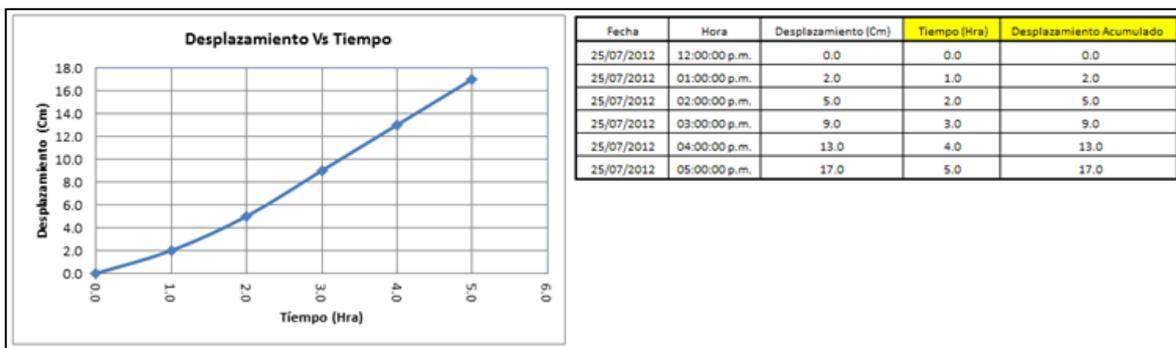
$$\Delta L = l_f - l_i \tag{01}$$

Dónde:  $L_f$ : longitud o medida final del extensómetro.

$L_i$ : longitud o medida inicial del extensómetro.

$\Delta L$ : diferencia de longitud o medidas.

Se recomienda realizar el análisis del comportamiento de los taludes del tajo abierto con el desplazamiento acumulado. Para el ejemplo se han tomado datos de un extensómetro.



Fuente: (Paredes, 2009, p.47).

**Figura 1.5:** Desplazamiento acumulado vs tiempo

- **Desplazamiento incremental:**

Cuando nos referimos al desplazamiento incremental estamos hablando del desplazamiento que se origina de la diferencia de la última medida menos la penúltima medida. Para calcular el desplazamiento incremental se usa la Ecuación 02.

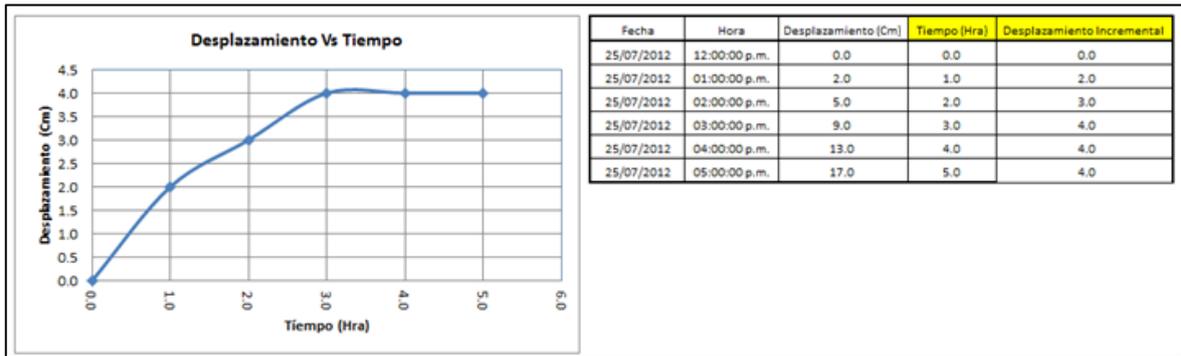
$$\Delta L_i = L_u - L_p \quad (02)$$

Dónde:  $L_f$ : longitud o medida final del extensómetro.

$L_i$ : longitud o medida inicial del extensómetro.

$\Delta L$ : diferencia de longitud o medidas.

Este criterio no es recomendable para el análisis de movimiento ya que el desplazamiento incremental es menor que el desplazamiento acumulado o real. Para el ejemplo se han tomado datos de un extensómetro.



Fuente: (Paredes, 2009, p.49)

**Figura 1.6:** Desplazamiento incremental vs tiempo

- **Velocidad Media:**

El termino velocidad se emplea para indicar que tan rápido se mueve un objeto, indicar su magnitud y la dirección en la que se mueve, por lo que se puede afirmar que la velocidad es un vector (Giancoli, 2008, p.21).

La velocidad media se traduce en la Ecuación 03; pero se debe tener cuidado de confundir velocidad media con rapidez media.

$$V = (d_f - d_i) / (t_f - t_i) \quad (03)$$

Dónde:  $d_f$ : longitud o medida final del extensómetro.

$d_i$ : longitud o medida inicial del extensómetro.

$t_f$ : tiempo que registró la última medida.

$t_i$ : tiempo que registró la primera medida.

Esta velocidad no refleja lo que realmente paso antes de la última medida, es por eso que no es recomendable usar este criterio.

- **Velocidad Instantánea:**

Es la velocidad promedio en un intervalo de tiempo infinitesimalmente corto (Giancoli, 2008, p.21). Esta velocidad se calcula haciendo que el límite del tiempo tienda a cero, la Ecuación 04 traduce lo descrito:

$$U = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} (d_f - d_i) / (t_f - t_i) \quad (04)$$

Dónde:  $U$ : velocidad Instantánea.

$d_f$ : longitud o medida final del extensómetro.

$d_i$ : longitud o medida inicial del extensómetro.

$t_f$ : tiempo que registró la última lectura.

$t_i$ : tiempo que registró la primera lectura.

Este es el criterio apropiado si se quiere analizar por Velocidad; pero para este análisis se debe ajustar los datos mediante una tendencia de regresión y esto es muy tedioso, por tal motivo se usa el siguiente criterio.

- **Velocidad Incremental:**

Esta velocidad es muy importante porque es la que se usa en primera instancia como variante de la velocidad instantánea ya que sin necesidad de encontrar tendencias de regresión podemos darnos una idea del comportamiento de la velocidad. Los resultados presentan tendencias similares a los de la velocidad instantánea. La Ecuación 05 se usa para calcular esta velocidad incremental.

$$U_{in} = (d_u - d_p) / (T_u - T_p) \quad (05)$$

Dónde:  $U_{in}$ : velocidad Incremental.

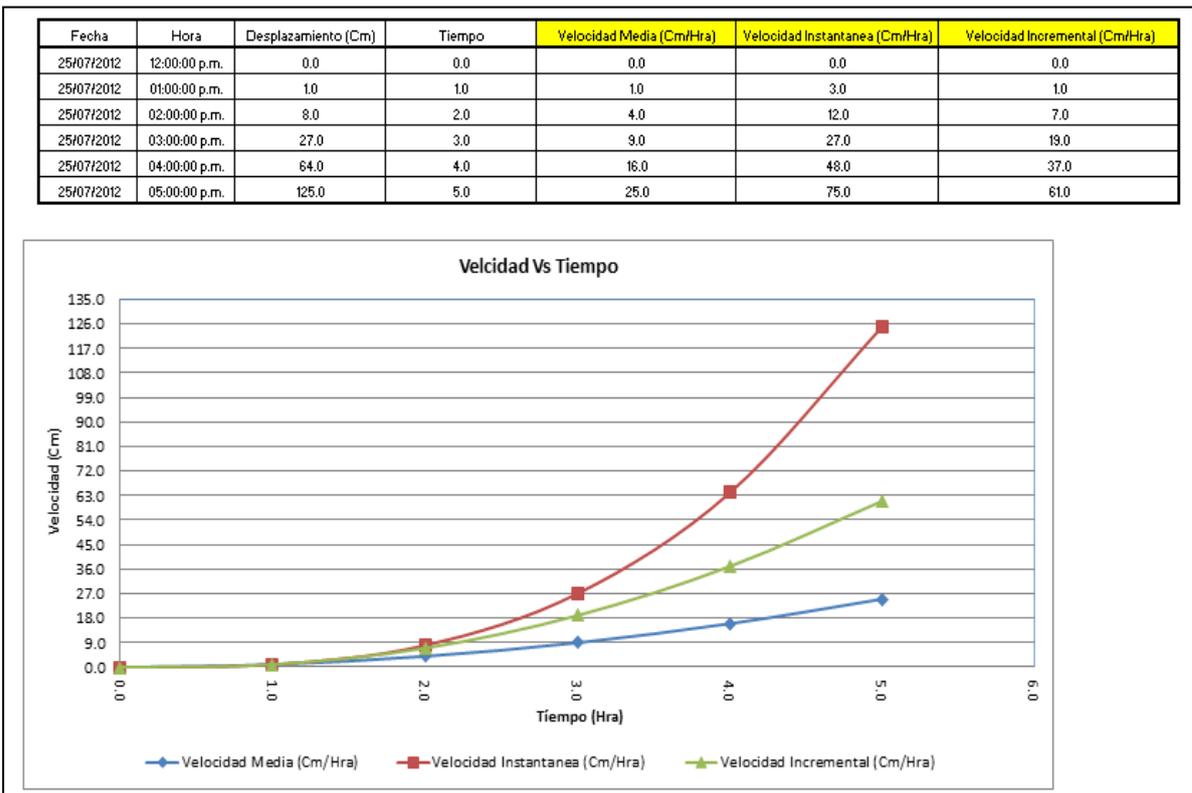
$d_u$ : longitud o medida ultima del extensómetro.

$d_p$ : longitud o medida penúltima del extensómetro.

$T_u$ : tiempo que registró la última lectura.

$T_p$ : tiempo que registró la penúltima lectura.

En la siguiente figura se muestra la comparación de las tres velocidades descritas, donde se aprecia que la velocidad instantánea es mayor que las otras velocidades y la velocidad media es menor; por lo que la velocidad incremental es la más conservadora (Paredes, 2013, p.51).



Fuente: (Paredes, 2013, p.52)

**Figura 1.7:** Velocidades media, instantánea e incremental

### 1.3.1.2 Características de los sensores de monitoreo para un sistema de monitoreo geotécnico integral

La realización de repeticiones de observaciones sistemáticas de un área o sector se denomina monitoreo, según (SafeLand, 2012), para lo cual se emplean instrumentos o sensores los cuales deben cumplir características adecuadas, para medir con precisión y eficiencia los desplazamientos y deformaciones que se presentan en los taludes mineros.

#### ✓ **Características de los sensores o instrumentos**

Los instrumentos de monitoreo cumplen las siguientes características (Cruces, 2014, p.85):

- Deben ser robustos, confiables y deben funcionar por largos periodos, sin reparaciones o reemplazos.
- Deben generar respuestas inmediatas, además de ser precisos en cambios que puedan aparecer en eventos geotécnicos.

- Deben tener accionamiento eléctrico, debido a que son confiables en lecturas y autonomía, durables, robustos y soportan condiciones climáticas extremas.
- Deben ser de marcas de prestigio y duración comprobables.
- Deben permitir conectarse a dataloggers para obtener lecturas automatizadas.
- Deben ser compatibles con la captura de datos manuales y la transmisión inalámbrica de datos.
- Deben contar con servicio técnico calificado en el país donde se adquirieron.
- Deben ser ajustados y calibrados por personal especializado de la casa proveedora con el objetivo que los datos medidos sean confiables.
- Deben presentar en sus características técnicas las precisiones angulares y de distancia, definidas por los fabricantes.
- Deben presentar sus grados de protección IP ante polvo y agua.

✓ **Tipos de sensores de acuerdo a los movimientos a detectar**

Desde los principios de la operación de la mina se deben implementar sensores de monitoreo, tanto manuales como automatizados los cuales deben integrarse a un sistemas de monitoreo integral. Estos instrumentos deben presentar propiedades que correlacionen las dimensiones que medirán en los monitoreos de tal manera que identifique: los movimientos superficiales, en el interior del terreno, las aperturas de grietas, presiones intersticiales y los niveles de agua subterránea (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño y Oteo, 2002, p.118).

**Tabla 1.1:** *Instrumentos utilizados y sus aplicaciones en el monitoreo.*

<b>Instrumento/ dispositivo</b>	<b>Aplicación</b>
Indicador de nivel de agua – INA	Posición del INA en el interior de macizos naturales o implementados/construidos
Piezómetro	Presión de poros en elevaciones pre-determinadas de los macizos rocosos
Inclinómetro	Desplazamientos a lo largo de su profundidad
Marco superficial	Desplazamientos superficiales
Medidor de flujo	Flujo de fluentes – drenaje interno y superficial
Extensómetro	Determinación de desplazamientos verticales
Células de presión total	Medición de la carga y presión de anclas en vertederos y taludes
Medición de la carga y presión	Desplazamientos superficiales. Permiten también la

de anclas en vertederos y taludes	determinación precisa de las velocidades y aceleraciones asociadas a estos desplazamientos
GPS de monitoreo	Desplazamientos superficiales.
Drones	Desplazamientos (verticales y horizontales) y generación de modelos DTM
Escáner	Desplazamientos superficiales (verticales y horizontales) y generación de modelos geológicos de las estructuras
Sismómetros/Acelerómetros	Aceleraciones derivadas de sismos naturales, explosiones, tráfico y otras fuentes
Geófonos	Conocimiento de la posición del NA y de la percolación de aguas en el interior del macizo, a través de Interferometría sísmica
Estación Meteorológica	Temperatura, Precipitación, presión y viento.

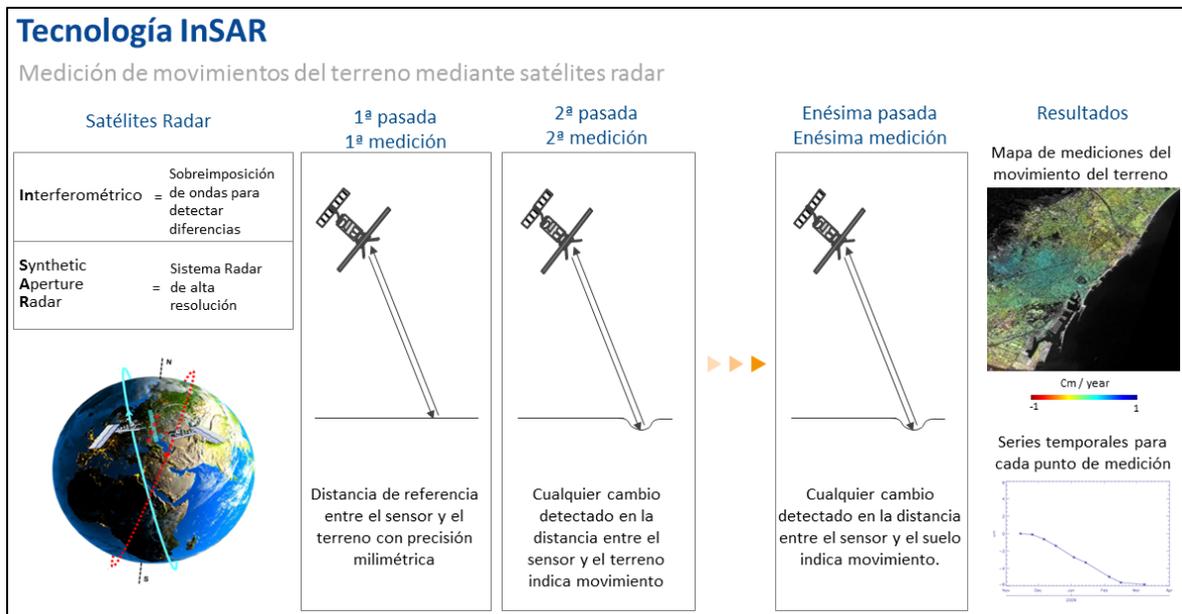
Fuente: (IntellTech, 2017).

- **Sensores Superficiales**

Permiten monitorear la superficie de los taludes, con la finalidad de detectar los desplazamientos y velocidades que se puedan presentar en los taludes. Entre las principales técnicas y sensores de monitoreo superficial tenemos:

→ **Radar (Radio Detection and Ranging):** Su finalidad es detectar remotamente objetos, mediante la medición de distancias por radio. Las ondas o microondas de radio son ondas electromagnéticas con longitudes que varían desde 1 mm hasta 1 m. Los radares presentan antenas que emiten pulsos con amplitudes de longitud de ondas predefinidas y también antenas receptoras que estiman el rango, miden la amplitud y la fase (tiempo entre ondas) de los pulsos. Las ondas de radio, a diferencia de las infrarrojas, son menos influenciadas por las condiciones atmosféricas, permitiendo realizar adquisiciones en lluvias intensas como en niebla espesa, por otro lado si mayor es la longitud de onda, la precisión y resolución es menor; pero se logra una mejor penetración y estabilidad de la señal de retorno. Los radares de apertura sintética o SAR (Synthetic apertura radar) es una técnica que permite observar la tierra en varias polaridades y obtener resoluciones muy nítidas (SafeLand, 2012).

**SAR Interferométrico (InSAR):** Realiza el monitoreo continuo de movimientos de puntos fijos, aplicando el principio de cambio de fase. (SafeLand, 2012). El movimiento del terreno se obtiene a partir de satélites radar, comparando la distancia entre el sensor y el terreno en momentos diferentes.



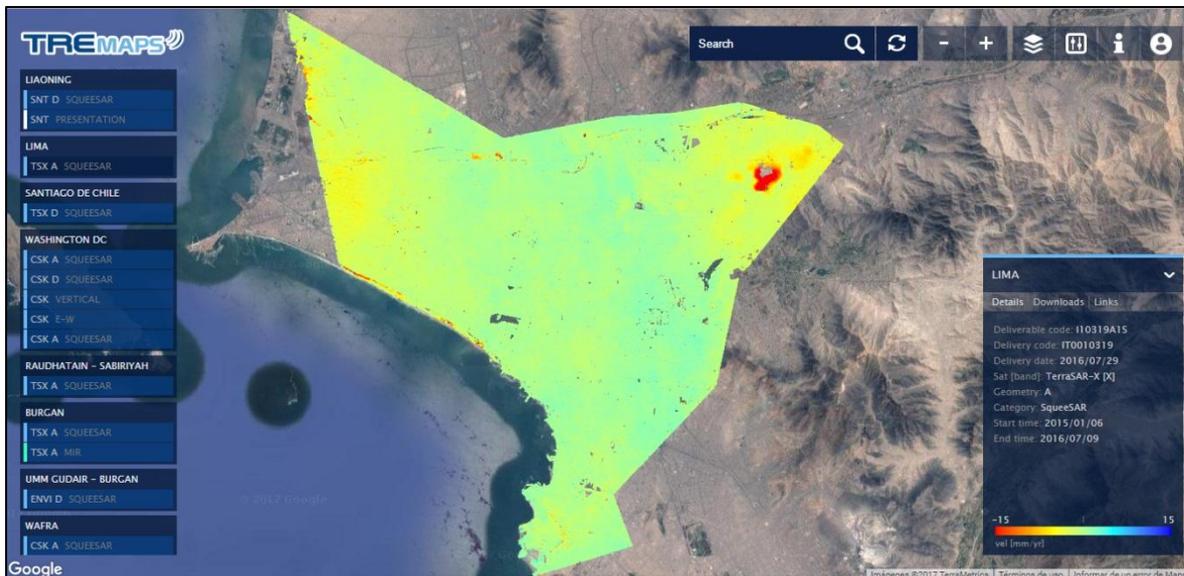
Fuente: TRE Altamira

**Figura 1.8:** Forma de medición del radar satelital

**SAR Interferométrico diferencial (DInSAR):** Permite analizar movimientos o pequeñas deformaciones en la superficie, analizando las diferencias de fase de dos imágenes tomadas del mismo lugar, en periodos diferentes de tiempo. Emplea un modelo digital de elevaciones (DEM) base sobre el cual se analizaran los movimientos. Esta técnica permite obtener precisiones milimétricas; pero hay que tener en cuenta que son afectados por ruidos al momento de la toma como: falta de correlación geométrica y temporal, efectos atmosféricos y efectos de orbita (SafeLand, 2012).

**SAR Interferométrico multitemporal (DInSAR avanzado):** Mejora la calidad de los resultados DInSAR ya que utiliza varias adquisiciones SAR a lo largo del tiempo, sobre una misma área, permitiendo detectar y medir desplazamientos en el tiempo. Alrededor de 20 tomas deben utilizarse para realizar un análisis multi-interferométrico, la velocidad mínima de movimiento detectado es de 1mm/año (SafeLand, 2012).

Tre Altamira es una empresa líder a nivel mundial, dedicada a la observación terrestre con amplia experiencia en la medición milimétrica de los movimientos del terreno a partir de imágenes radar captadas por satélite.



Fuente: TREA Altamira

**Figura 1.9:** Imagen de Lima, desplazamientos de enero 2015 a julio 2016

En resumen, esta tecnología es empleada para detectar movimientos centimétricos o milimétricos en grandes extensiones de terreno, brindando información de sectores inestables, sobre los cuales luego se realiza una estrategia de monitoreo, para realizar el seguimiento puntual.

Las mineras emplean esta tecnología, para correlacionar la información de los sensores terrestres de monitoreo y para detectar el comportamiento del terreno fuera del tajo abierto, como botaderos, presa de relaves y caminos de accesos.

→ **InSAR terrestre (GB InSAR – Ground Based InSAR):** Es una técnica interferométrica diferencial en tierra denominada GB InSAR. Se emplea para monitorear y detectar deslizamientos e inestabilidades. Este sistema presenta muchas ventajas, ya que analiza todo el área en movimiento en frecuencia de tiempos muy cortos, mientras que otras técnicas como estaciones totales, extensómetros, etcétera, brindan información puntual (SafeLand, 2012).

En el mercado mundial existen dos grupos de radares terrestres:

**RAR: Real Aperture Radar**, son conocidos como radares no coherentes, ya el tamaño de la antena es controlado por la longitud física de la antena. Son equipos de diseño portátil, así como el procesamiento de los datos; pero la desventaja es que su resolución es débil en el rango cercano. La imagen radar tienen una resolución limitada por la longitud de antena, debiendo ser esta varias veces el tamaño de la longitud de onda para disminuir el ancho de banda de la señal enviada, por lo que no es práctico diseñar una antena muy grande para producir la resolución (Villena, 2008).

**SAR: Synthetic Aperture Radar**, procesa con complejos algoritmos la data capturada por las antenas del radar. Este proceso combina los datos obtenidos de varios barridos de la antena, creando así un barrido virtual. Finalmente el radar SAR brinda el mismo resultado, si se tuviera una antena mucho más grande (Villena, 2008).

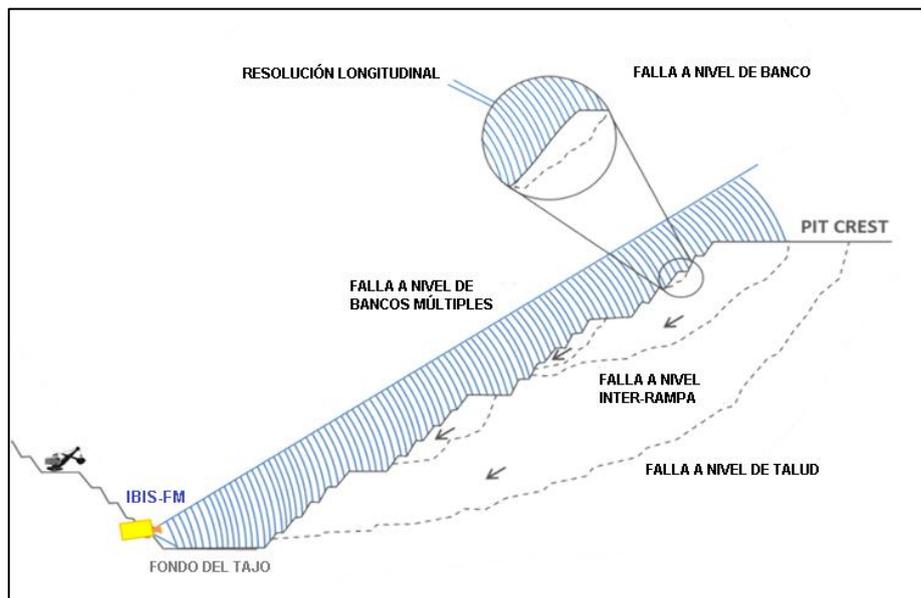


Fuente: IDS Georadar

**Figura 1.10:** Tecnologías de radar terrestre SAR - RAR

En el SAR, cada muestra de cada pixel posee información en amplitud  $|I(n)|$  y fase  $\varphi n$ . El análisis interferométrico diferencial entrega información sobre el desplazamiento de un objeto comparando la información de fase de las ondas reflejadas por el objeto y capturada en momentos diferentes. En el caso del radar IBIS este es capaz de evaluar el desplazamiento de cada pixel resuelto mediante las técnicas de frecuencia escalonada de onda continua SFCW y la técnica SAR (IDS Ingegneria dei Sistemi, 2012).

La técnica Frecuencia Escalonada de Onda Continua (SFCW) permite determinar la resolución del escenario en la dirección longitudinal sea independiente de la distancia, siendo la resolución longitudinal del radar IBIS hasta 0.5m, del mismo modo la técnica SAR permite determinar la resolución transversal, siendo la Resolución Transversal del radar IBIS hasta 4.3 mrad y también la técnica de Interferometría Diferencial permite medir el desplazamiento de objetos resueltos mediante las técnicas SFCW y SAR, siendo la precisión del radar IBIS hasta 0.1 mm (SafeLand, 2012).



Fuente: IDS Georadar

**Figura 1.11:** Monitoreo de bancos con el radar SAR

En resumen, esta técnica de monitoreo, es la más empleada actualmente por las principales mineras del Perú, ya que permite obtener el pixel con la mejor resolución, alcance hasta de 5 km con una cobertura de 360° y 40 segundos de toma, en el modelo ArcSAR. Los datos generados son desplazamientos acumulados, velocidades, aceleraciones, alertas tempranas y mapas de riesgos.



Fuente: IDS Georadar

**Figura 1.12:** Radar móvil SAR

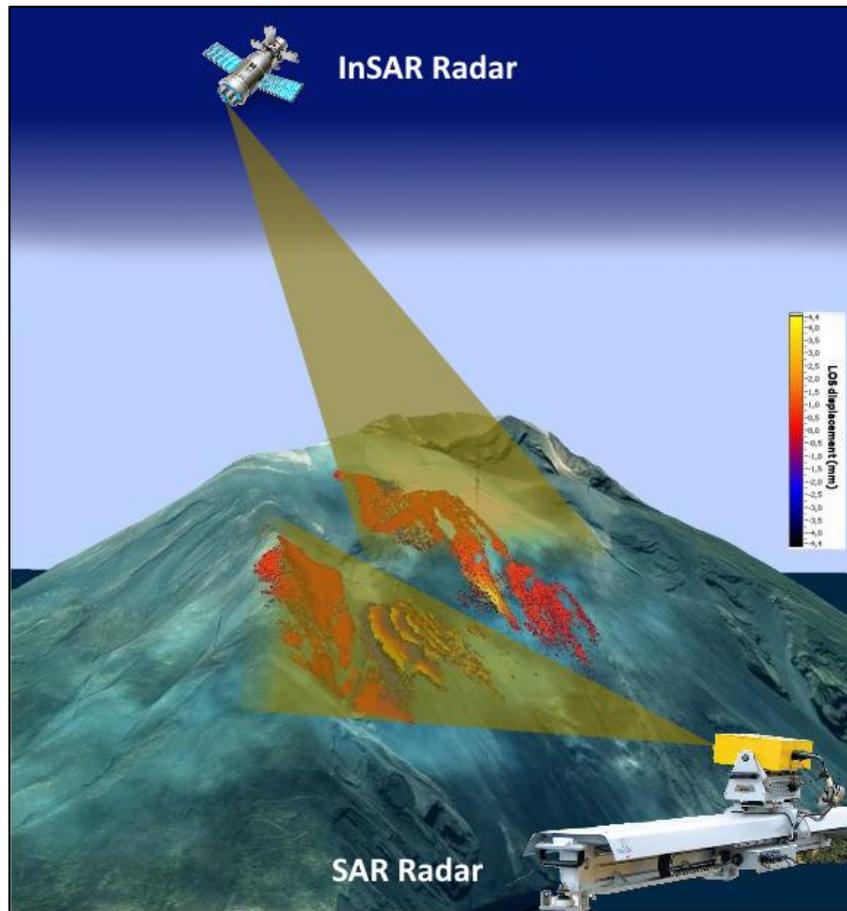


Fuente: IDS Georadar

**Figura 1.13:** Mapa de riesgos y alertas generadas por el radar terrestre.

Cabe señalar que las tecnologías radar, tanto la InSAR que permite el análisis de grandes áreas, con la obtención de centenas de miles de puntos de monitoreo con una precisión submilimétrica y la SAR que permite adquirir datos virtualmente en tiempo real, para obtener las informaciones de desplazamientos que serán convertidas en datos confiables de velocidad y aceleración de las partículas de un macizo. Estas informaciones, pueden ser utilizadas para la

definición de alarmas y para la predicción de roturas, así como su integración en el sistema de monitoreo integral (IntellTech, 2017).



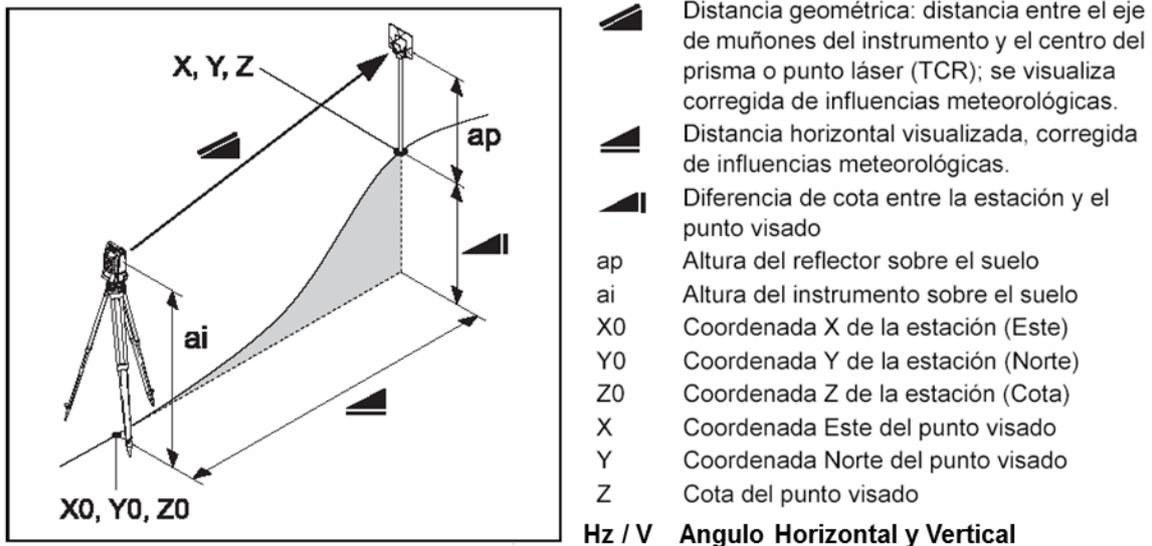
Fuente: IntellTech

**Figura 1.14:** Sistema de monitoreo con radares SAR e InSAR.

→ **Estación total robotizada con prismas y software GeoMoS:** El otro tipo de monitoreo superficial muy empleado es el método topográfico. Este método emplea estaciones totales manuales o robotizadas, siendo estas últimas las más precisas ya que tienen un sistema automático de búsqueda del centro del prisma, permitiendo medir siempre el centro del prisma y detectando así movimientos horizontales y verticales, con precisión alta del orden del milímetro (Leica Geosystems, 2009).

La estación total es un instrumento topográfico de precisión que funciona de manera electrónica, el cual se compone de: un teodolito, con el cual mide los ángulos horizontales y verticales; un distanciometro, con el cual mide las distancias inclinadas; un microprocesador, con el cual realiza los cálculos; una

memoria, donde se almacenan los datos capturados y procesados; un sistema de nivelación con el cual controlan los movimientos o vibraciones que afectan las mediciones y programas de campo, que permiten desarrollar el trabajo de campo de manera rápida y eficiente (Leica Geosystems, 2009). La estación total permite obtener los siguientes datos:



Fuente: Leica Geosystems, manual de uso de TPS1200.

**Figura 1.15:** Datos registrados por las estaciones totales

Las estaciones totales son instrumentos muy precisos, siendo ajustados y calibrados en fábrica a la mejor precisión posible, por lo que se deben tener en cuenta el siguiente procedimiento de empleo:

- **Mantenimiento periódico:** la inspección, mantenimiento, calibración y ajuste de los instrumentos se debe efectuar en un taller de servicio técnico autorizado por fábrica, cada 06 meses (Leica Geosystems, 2009).
- **Ajuste y calibración:** Los instrumentos se desarrollan, arman y ajustan con la máxima calidad; pero debido a los golpes o tensiones y a las modificaciones rápidas de temperatura, pueden influir en la exactitud del instrumento, por lo que se recomienda ajustar y comprobar el instrumento. Se pueden realizar:
  - Ajustes electrónicos: Error de colimación, Error de perpendicularidad, ATR, Error de índice del compensador de los ejes, etc.
  - Ajustes mecánicos: Rayo láser visible, plomada láser, tornillos del trípode, Nivel Esférico del instrumento y la base nivelante (Leica Geosystems, 2009).

**Mediciones precisas:** La obtención de mediciones precisas en el monitoreo es de vital importancia, para lo cual se debe realizar (Leica Geosystems, 2009):

- Ajustar y comprobar el instrumento de vez en cuando.
- Medir en las dos posiciones del anteojo los puntos.
- Adaptar el instrumento a la temperatura del ambiente antes del trabajo.
- Proteger al instrumento de la luz solar directa.
- Hacer una buena nivelación del instrumento.
- Colocar el instrumento en un punto conocido y señalado.
- Orientar el equipo usando una referencia o punto conocido.
- Realizar las correcciones atmosféricas, para corregir las distancias.
- Ingresar la constante y altura del prisma.
- Empezar a medir, para lo cual si emplea una estación manual siempre se debe medir al centro del prisma, en caso emplee una estación total robotizada se debe emplear el sistema ATR.

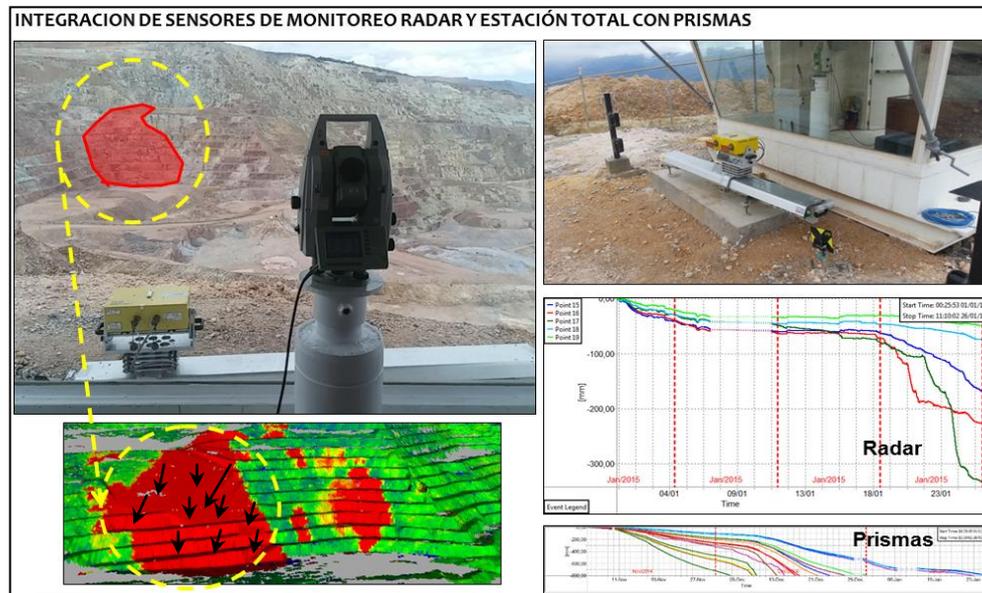
La continuidad de las lecturas y la captura de datos con la estación total obedecen a las dimensiones a medir y a la velocidad de la técnica a controlar. El sistema de medición que utiliza la estación total robotizada permite medir ángulos y distancias desde un punto base fijo y perpendicular a la línea de prismas a medir, con la finalidad de evitar errores de lectura angular (Leica Geosystems, 2009).

Las fases del monitoreo de taludes con estación total robotizada, para determinar sus comportamientos son cuatro, siendo estas las siguientes (Leica Geosystems, 2009):

- Monitoreo con estación total robotizada y prismas: Este puede ser manual o automatizado, depende de la frecuencia de lecturas que se requieran tomar y del comportamiento estable o inestable que presente el terreno.
- Registro de Datos de Campo: Cada vez que se mide un prisma se registran los datos crudos de un punto en un tiempo definido, este dato está expuesto a problemas atmosféricos como lluvia, niebla, polvo, entre otros, generando ruidos los cuales distorsionan las gráficas por lo que deben corregirse.
- Depuración y Procesamiento de Datos: Los errores generan los llamados saltos o ruidos en las gráficas de desplazamiento y velocidad los cuales



En resumen, este sistema es el más empleado para monitoreo superficial en las principales minas del Perú, siendo el modelo TM50, marca Leica, la más utilizada. Cabe precisar que los dos sistemas de monitoreo presentados son los más usados en el mercado mundial, siendo ambos complementarios.

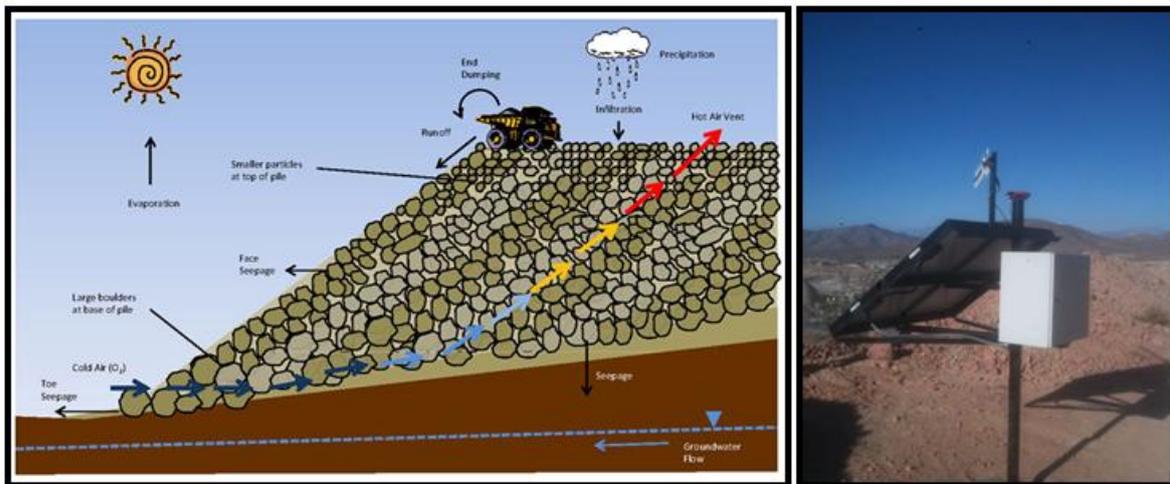


Fuente: Química Suiza Industrial del Perú, trabajos ejecutados en mina.

**Figura 1.17:** Complementariedad de tecnologías radar y estaciones totales.

→ **GNSS / GPS diferencial dGPS con software de control GeoMoS:**

Otro tipo de monitoreo superficial es usando el método geodésico por medio de GPS diferenciales, los cuales captan las ondas electromagnéticas emitidas desde varias constelaciones de satélites, obteniendo una posición única en coordenadas absolutas (UTM o geográficas). Estos sensores obtienen precisiones milimétricas, siendo idóneas para emplearse en el monitoreo de deslizamientos muy lentos, etapas de pre fallas en deslizamientos de rocas y en el control de las grietas ya que a diferencia de un extensómetro permite medir las 03 dimensiones permitiendo calcular el vector de desplazamiento (SafeLand, 2012).



Fuente: Leica Geosystems, manual de entrenamiento.

**Figura 1.18:** Diagrama de monitoreo con GNSS / GPS.

En resumen estos sensores están siendo empleados principalmente en el control de las grietas que se presentan en los botaderos, consiste en colocar un equipo base como el GR25 de Leica, en un punto conocido conectado a energía y red de comunicaciones permanente y en campo se colocan equipos móviles como los GMX910 los cuales monitorean el punto de campo, ambos equipos envían la información a una PC donde el software Spider de Leica post procesa diferencialmente los datos crudos y envía los resultados ajustados al GeoMoS para que grafique los desplazamientos y velocidades (Leica Geosystems, 2013).

En el caso específico de deformación estructural se debe distinguir entre aquellas caracterizadas por un movimiento lento, como es el caso de presas, y aquellas cuya deformación tiene naturaleza cíclica, como en el caso de las vibraciones de puentes provocadas por la carga del tráfico de vehículos o vibraciones en torres provocadas por ráfagas de viento. El GPS tiene aplicación en ambos casos. Desde su desarrollo inicial, el GPS es usado con éxito en el monitoreo de la estabilidad de estructuras, como represas y puentes.

→ **Extensómetros:** Son sensores utilizados para medir las grietas en los tajos abiertos y principalmente en los botaderos de las minas. Este sistema registra datos de desplazamiento unidimensional convirtiendo los movimientos circulares en lineales. El equipo consta de un trípode, una polea que funciona como pesa y otra polea que al girar registra los movimientos, un procesador de datos, un sistema de comunicación por radio, un panel solar, una batería, un cable y una estaca. El criterio para instalar estos equipos en campo es muy

importante ya que una mala instalación puede causar errores. Se considera una buena instalación cuando el cable cruza lo más perpendicular posible desde la cresta hasta la plataforma (Paredes, 2013, p.42).



Fuente: (Paredes, 2013, p.43).

**Figura 1.19:** Extensómetro digital.

- **Sensores Hidrogeológicos**

Permiten monitorear la presión de poros empleando excavaciones de observación o piezómetros, siendo estos de tubo abierto, neumáticos o de cable vibrador. Las características de su funcionamiento y precisión definirán el tipo de piezómetro a utilizar en cada estudio específico (Suarez, 2009, p.514).

→ **Piezómetro de cabeza abierta:** Un modelo es el Casagrande, el cual está conformado por un tubo poroso de cerámica enlazado a un mango de caucho que se conecta a un cilindro plástico. Estos piezómetros son los más confiables. Entre las características más importantes se puede mencionar que son simples y fáciles de interpretar, alta durabilidad, mantenimiento fácil, permite monitorear el nivel del agua freática y medir la permeabilidad del suelo. Para automatizar la adquisición de datos de los piezómetros de cabeza abierta se puede colocar en el tubo un piezómetro de cuerda vibrante (Suarez, 2009, p.516).

→ **Piezómetro Neumáticos:** Este piezómetro está formado por un vértice poroso vinculado a un diafragma muy sensible que se acciona por fluidos o gases y necesita de una lectora exterior, la cual produce presión dentro del sistema interno del piezómetro logrando igualar la presión en la cavidad del mismo. La precisión se basa en el equipo de medición, es por ello que cuando las presiones son muy bajas y el nivel de precisión de las lecturas no son muy exactos (Suarez, 2009, p.517).

→ **Piezómetro de Hilo Vibrátil:** Este piezómetro también se denomina de cuerda vibrante, presenta un diafragma metálico que divide la presión del agua del sistema de medida. Un cable tensionado está enlazado al punto central de un diafragma metálico. Las deflexiones del diafragma generan modificaciones en la tensión del cable, la cual es medida y transformada en presión. Entre las ventajas de este equipo se presenta la facilidad de lectura y la poca interrupción en la colocación de rellenos, también puede medir presiones negativas de agua y la gran ventaja es que se pueden capturar los datos de manera automática y enviarlos a largas distancias por medio de los dataloggers (Suarez, 2009, p.518).

- **Sensores climatológicos**

Estos permiten monitorear las condiciones climatológicas que se presentan en la operación minera.

→ **Estaciones meteorológicas:** Permiten registrar y cuantificar la forma continua de diversos parámetros meteorológicos (Vázquez, 2013, p.86). Los instrumentos más comunes que forman parte una estación son:

- **Termómetro:** Determina la temperatura en diversas horas del día.
- **Barómetro:** Determina la presión atmosférica en la superficie.
- **Pluviómetro:** Determina la cantidad de agua caída sobre el suelo en metros cuadrados en forma de granizo o nieve y lluvia.
- **Anemómetro:** Determina la velocidad del viento.
- **Higrómetro:** Determina la temperatura del punto de rocío y la humedad relativa del aire.
- **Veleta:** Determina la dirección del viento.

En las zonas de deslizamiento, lo que más interesa es conocer la cantidad de agua, que cae sobre la superficie afectada, así como la temperatura de la zona (Vázquez, 2013, p.86).



Fuente: IntellTech

**Figura 1.20:** Estación meteorológica digital

### ✓ Técnicas de monitoreo

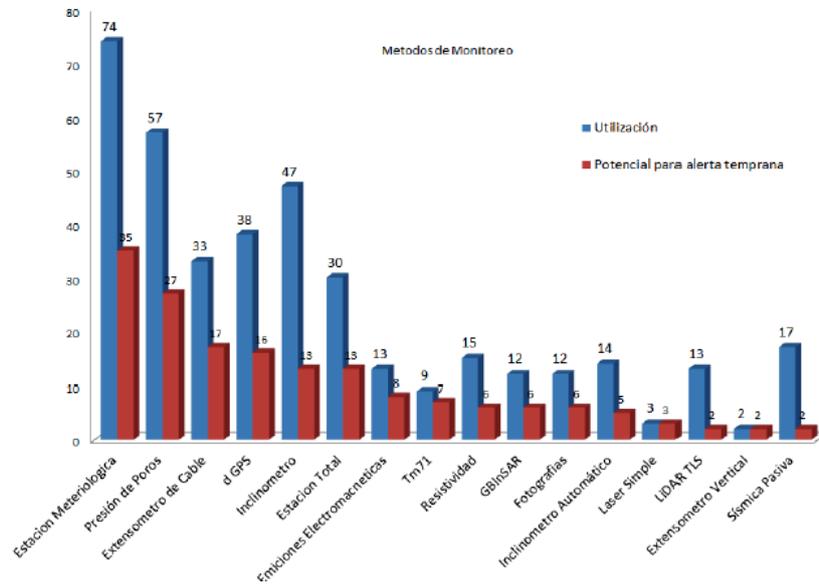
Para (SafeLand, 2012), presenta los métodos más modernos entre técnicas e instrumentos para realizar el monitoreo de los taludes, en el siguiente esquema:



Fuente: SafeLand, 2012

**Figura 1.21:** Técnicas de caracterización y monitoreo.

Los instrumentos más utilizados en los sistemas de monitoreo geotécnico, deben permitir monitorear los desplazamientos y deformaciones con métodos in situ, factores hidrogeológicos y parámetros climatológicos (SafeLand, 2012).



Fuente: SafeLand, 2012

**Figura 1.22:** Métodos más utilizados para los sistemas de monitoreo

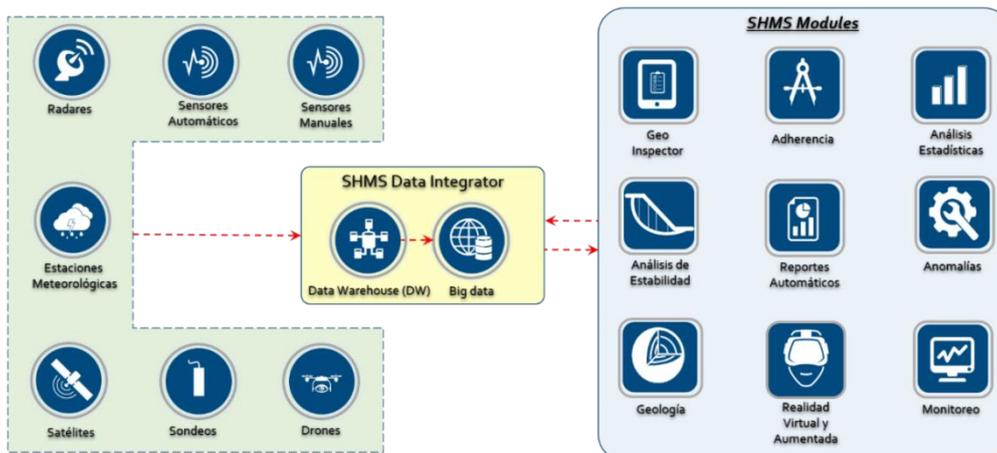
### 1.3.1.3 Generar mapas de riesgos con el sistema de monitoreo integral

El sistema de monitoreo integral es una herramienta que busca resolver problemas surgidos con el crecimiento del número de instrumentos instalados en las minas, siendo el principal de ellos la dificultad en obtener información a partir de los datos. Este obstáculo proviene principalmente de dos características fundamentales: la primera, la gran proporción de datos disponibles fruto de la gran cantidad de instrumentos y de la alta frecuencia de medición que estos tienen, gracias a lecturas automatizadas; y la segunda, de la descentralización de los datos, causada por diferentes estándares de almacenamiento, presentación y disponibilidad, adoptados por cada fabricante de instrumentos; por lo que el sistema debe integrar los datos de los sensores manuales y automáticos en una sola base de datos unificada, contextualizada y estandarizada, con la finalidad de procesarlos mediante sus módulos de análisis estadístico y de estabilidad, determinar los umbrales de alertas para generar los mapas 2D-3D de riesgos, alertas tempranas y generación de reportes automáticos (IntelliTech, 2017).

✓ **Módulos del Sistema de monitoreo geotécnico integral**

En el mercado mundial actualmente la tendencia es a emplear herramientas de monitoreo que permitan integrar los datos de los sensores de monitoreo; debiendo cumplir estos sistemas con el principio de modularidad y escalabilidad de la manera que se vayan implementando de acuerdo a la necesidad y posibilidad de los interesados. Los módulos que deben presentar los sistemas integrales de monitoreo son:

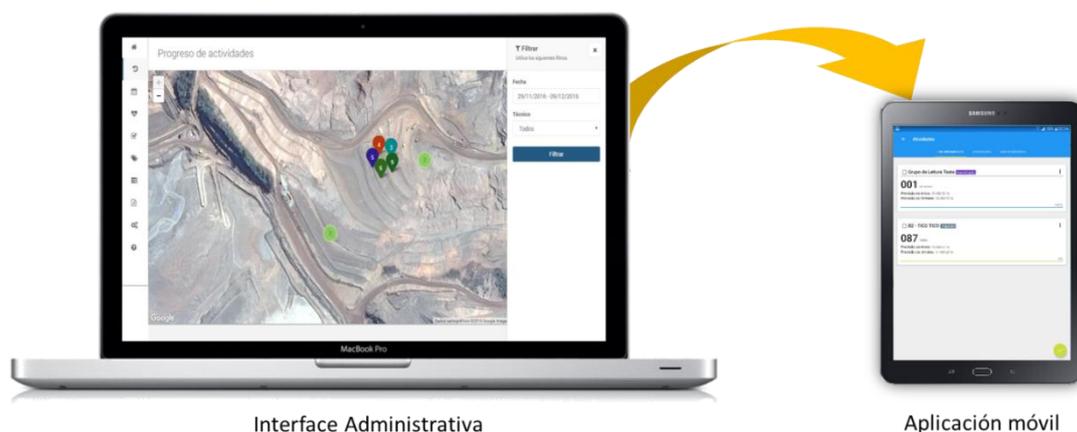
• **Modulo Integrador de Datos:** Permite la integración contextualizada, estandarizada y normalizada de los datos temporales y/o espaciales de todos los instrumentos y/o sensores de monitoreo de diversas marcas, instalados en presas, botaderos y el tajo abierto de la mina. La gestión es realizada a través del registro y estandarización de los tipos de instrumentos, así como de sus respectivas configuraciones y particularidades inherentes. Una vez registrados, el Integrador de Datos puede obtener, automáticamente, las lecturas realizadas, proporcionando datos brutos y datos calculados transformados con el uso de fórmulas usadas en las áreas de Ingeniería y/o similares, las cuales son previamente configuradas, de forma trivial, por el propio usuario, de acuerdo con el perfil de acceso. Este módulo debe permitir integrar datos de sensores conectados a redes estándar, dataloggers, base de datos SQL, accesos por FTP, archivos CSV o TXT. Todos los datos integrados deben ser auditables, permitiendo identificar la fecha y usuario que ingreso, modifico o elimino datos de monitoreo (IntellTech, 2017).



Fuente: IntellTech

**Figura 1.23:** Esquema de integración de sensores de monitoreo.

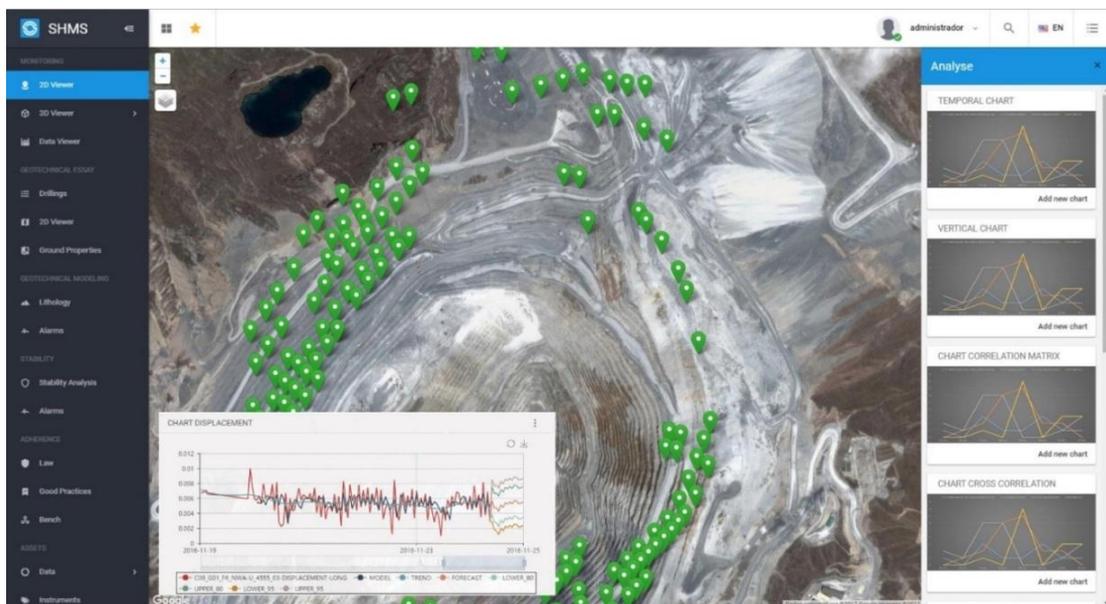
• **Módulo de control de campo:** Es el módulo WEB y Mobile que proporciona la gestión segura de las acciones de monitoreo e inspección en campo de las estructuras y activos geotécnicos. Este gestor puede realizar un seguimiento en tiempo real de las actividades, desde cualquier lugar del mundo. Siempre que se tenga al menos una señal 3G, la sincronización de los datos e informaciones recolectadas en campo se transmite automáticamente; lo mismo sucede en flujo inverso. Por medio del Geo Inspector, es posible recolectar las lecturas de los instrumentos manuales instalados en las estructuras de la mina e integrarlos a la base de datos centralizada. Este módulo cuenta con una estructura de formularios y fichas de lecturas dinámicas, donde es posible crear formularios, con número y formato de campos para ser llenados, y variables utilizadas tanto para el monitoreo como para la inspección. El llenado de las Fichas de campo, será realizado por técnicos, mediante el uso de Tablets. Todos los datos e informaciones son rastreables y auditables ya que en cualquier momento se podrá revisar quién ejecutó la tarea, la fecha, la hora y la geo localización. Es posible definir los turnos de los técnicos en campo, así como el plan de actividades de monitoreo y de inspección, también pueden ser creados planes de actividades de instalación, referentes a la adición de nuevos instrumentos. Las actividades pueden ser atribuidas a un equipo o a un técnico específico y pueden ser acompañadas por el visto bueno de los supervisores o la gerencia (IntellTech, 2017).



Fuente: IntellTech

**Figura 1.24:** Interfaces de los módulos móviles del sistema de monitoreo

• **Módulo de Monitoreo:** Permite hacer el seguimiento en tiempo real de las mediciones de los instrumentos de forma centralizada y contextualizada. La representación de los instrumentos es realizada en mapas 2D, a través de las herramientas WebGIS o en modelos digitales del terreno (DTM), que son reproducidos en 3D, de acuerdo con su posición real georeferenciada. Tanto los mapas 2D como los DTM's 3D son actualizados periódicamente, el primero con cada nueva foto de satélite disponible y el segundo con un nuevo escaneo de la estructura. Este módulo cuenta con una herramienta muy importante: la configuración de alarmas personalizadas para el monitoreo del comportamiento anormal de los datos medidos. A partir de este mecanismo, cada instrumento posee sus propias alarmas, variando tanto en la forma del cálculo (variación acumulada, estacionalidad, entre otras), como en los colores, valores límites, frecuencia de verificación y periodo de tiempo utilizado para el cálculo de cada alarma. En función de las alarmas es posible crear las reglas de envío de mensajes para las personas responsables, tanto por e-mail como directamente a sus teléfonos celulares. De esta manera, se evita la sobrecarga de información para los usuarios, mostrándole solamente lo que fue considerado más relevante (IntellTech, 2017).



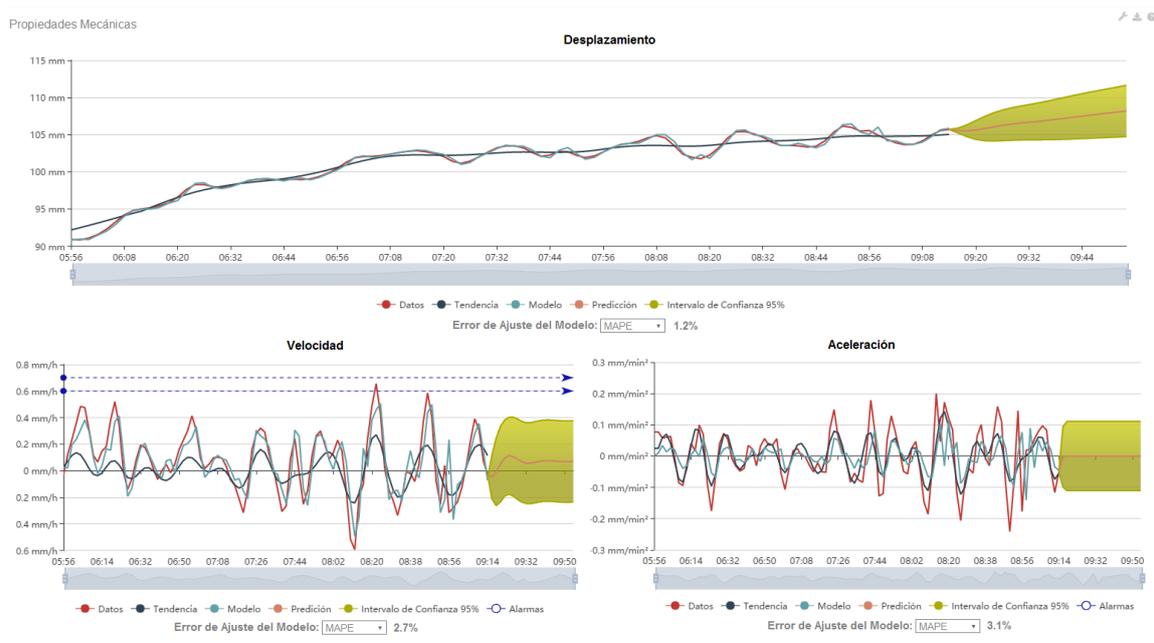
Fuente: IntellTech

**Figura 1.25:** Interfaz de distribución de todos los sensores de monitoreo.

• **Módulo de Análisis Estadístico y Predictivo:** El gran número de sensores instalados en los tajos abiertos de las minas y presas genera una cantidad enorme de datos proporcional al número y a la variedad de las mediciones. Sin embargo, los datos no significan necesariamente información, por lo que el módulo de análisis estadístico es muy importante ya que genera datos para determinar decisiones mediante las lecturas de los sensores (IntellTech, 2017).

La interfaz de un instrumento seleccionado por el usuario, es posible visualizar informaciones sobre: Desplazamiento, Velocidad, Aceleración, Predicción de los valores futuros de los instrumentos, el histórico de alarmas generadas en el punto analizado, predicción estadística del instante de rotura, la correlación del punto analizado con los demás puntos del grupo o grupos a los que pertenece, el Histograma de la serie temporal.

Es importante destacar que los términos velocidad y aceleración tienen que ser interpretados en su significado estadístico y no físico. Así, estos dos gráficos no necesariamente tienen que ver con movimiento, pero sí con la variación que representan los datos, o sea, la primera y segunda derivada de los datos con respecto al tiempo.



Fuente: IntellTech

Figura 1.26: Gráficas de las variables de control.

→ **Datos de la Estadística Descriptiva**

	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración
Media	102.25	0.15	0.01
Moda	102.5	0.10	0.02
Mediana	102.01	0.01	-0.01
Desviación Estándar	4.21	0.25	0.11
Varianza	17.72	0.06	0.01
Desviación Media	4.20	0.23	0.10
Coefficiente de variación	0.04	1.66	11.00
Asimetría <input type="text" value="Pearson"/>	-1.18	-0.05	-0.07
Curtosis <input type="text" value="Exceso"/>	0.72	-0.18	-0.16
Percentil <input type="text" value="75"/>	104.18	0.35	0.11
Mínimo	91.2	-0.60	-0.22
Máximo	106.20	0.62	0.20

Fuente: IntellTech

**Figura 1.27:** Matriz de estadística descriptiva.

El formulario de estadística descriptiva contiene una gran variedad de información sobre las características de las series analizadas, obteniendo varios aspectos estadísticos de los datos con el menor esfuerzo del usuario (IntellTech, 2017). Son:

- Media: promedio simple de los datos, así como la mediana y la moda, es una medida de tendencia central y muestra un valor de dispersión de los datos;
- Mediana: dato central de la distribución, o sea, si se ordenan los datos por su valor, la mediana es el dato que se presenta en la posición central;
- Moda: el valor, o intervalo de valores, que se repite más veces en los datos;
- Desviación estándar: es una estadística que mide cuanto los datos están lejos de media, así, cuanto más grande la desviación estándar más dispersos serán los datos;
- Varianza: es también una medida de dispersión, y se calcula como el cuadrado de la desviación estándar.

## → Correlación y Sensibilidad

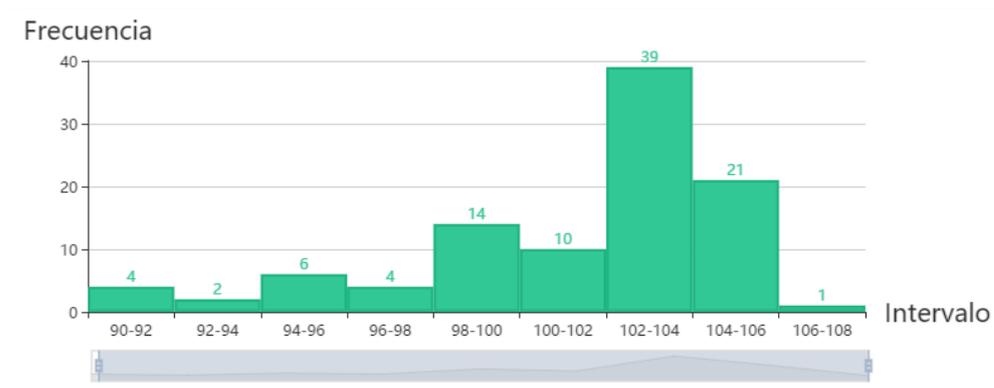


Fuente: IntellTech

**Figura 1.28:** Gráficas de correlación y sensibilidad de datos de instrumentos.

La correlación es una medida de similitud de comportamiento entre dos sensores distintos. Su valor varía entre menos uno (-1) y uno (1), cuanto más próximo a uno, o menos uno, más fuerte es la correlación, indicando gran semejanza en sus series temporales. El signo positivo de la correlación indica que las dos series varían en el mismo sentido, o sea, cuando una crece la otra también. Si el signo fuera negativo esto quiere decir que los comportamientos son opuestos, así, si una crece, la otra decrece (IntellTech, 2017).

## → Histograma



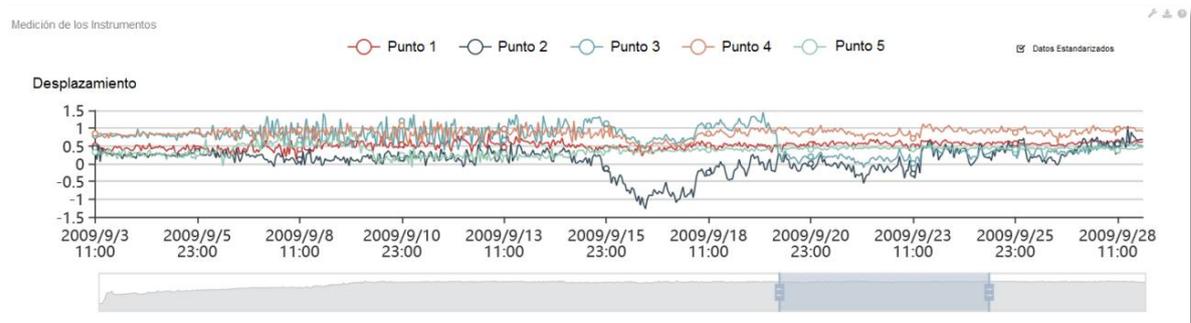
Fuente: IntellTech

**Figura 1.29:** Histograma.

El histograma es un gráfico que muestra, de manera visual, la distribución de los datos. Sirve para tornar explícitas varias características de la serie temporal, como la amplitud, intervalo más repetido, simetría, asimetría, tipo de distribución (plana o concentrada), etcétera. Vale resaltar que el período de análisis puede ser

configurado por el usuario y la amplitud de las clases es calculada automáticamente por el algoritmo. Este Análisis está presente en el módulo de Análisis Exploratorio (IntellTech, 2017).

### → Análisis de un grupo de instrumentos



Fuente: IntellTech

**Figura 1.30:** Gráficas escaladas de varios instrumentos.

Este formulario muestra las mediciones de instrumentos pertenecientes a un grupo sensores, proporcionando una visión general. Es posible estandarizar los datos, dejando todas las series en una misma escala, haciéndolas comparables en términos de comportamiento.

- **Umbrales de alertas**

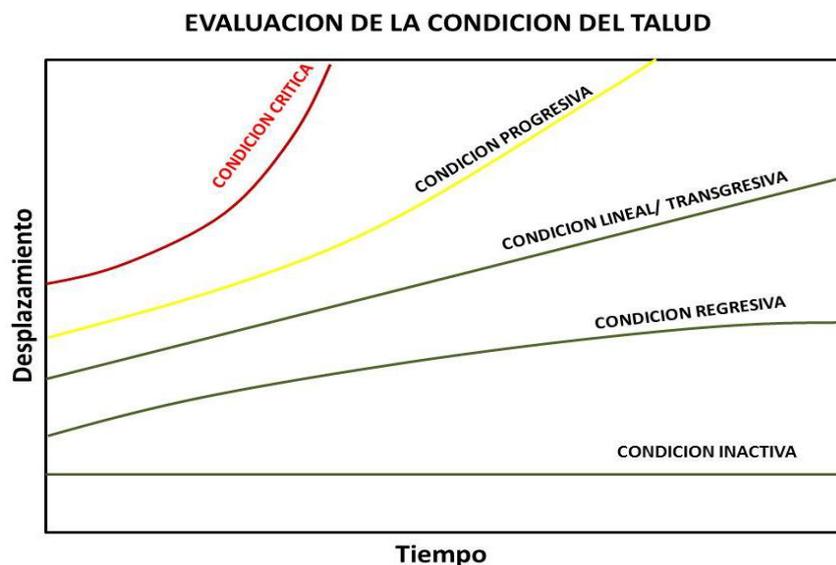
Las operaciones mineras se tornan cada vez más agresivas en su producción eso implica alterar las condiciones de estabilidad en tiempos muy cortos y para dar continuidad a la operación los departamentos de Geotecnia deben tener conocimiento y debe estar preparados para dar respuesta inmediata ante algún indicio de inestabilidad, para el efecto descrito se debe contar con instrumentos que monitoreen permanentemente el área de operación y sus componentes o estructuras de producción. Hoy en día los instrumentos mencionados proporcionan información en tiempo real eso implica dar respuestas inmediatas, para lo cual se deben calcular los umbrales de alertas. Para calcular los umbrales se deben obtener datos de los sensores y estos deben estar distribuidos de tal manera que se aproveche la perpendicularidad del punto de medida con el objetivo de medida. Este principio de perpendicularidad aprovecha la medida de acercamiento o alejamiento del sector en movimiento (Paredes, 2013).

Zavodni y Broadbent trabajaron para obtener a partir de una curva semi logarítmica una bilinealidad para obtener el tiempo de colapso, sobre el cual se ha definen los umbrales (Paredes, 2013, p.62).

**Tabla 1.2:** *Umbrales de alertas*

NIVEL	VERDE	AMARILLO	NARANJA	ROJO
MENSAJES DE ALARMAS	TENDENCIAS DE DESLAZAMIENTOS	TENDENCIAS DE DESLAZAMIENTOS	APERTURA DE GRIETAS	ACELERACION
RIESGO	NULO	BAJO	MEDIO	ALTO
MACIZO ROCOSO	0 - 10 cm/día	0 - 15 cm/día	15.01 - 45 cm/día	> 45 cm/día
MACIZO ROCOSO DEBIL	0 - 05 cm/día	0 - 10 cm/día	10.01 - 30 cm/día	> 30 cm/día
SUELO	0 - 03 cm/día	0 - 05 cm/día	05.01 - 15 cm/día	> 15 cm/día

Fuente: Propia.



Fuente: IntellTech

**Figura 1.31:** Condiciones de desplazamientos

Independiente a la instrumentación de campo, también se deben considerar contingencias para solucionar cualquier inconveniente que se presente, en función a los resultados del monitoreo. Se debe implementar un sistema de alertas como el que se muestra a continuación:

**Tabla 1.3:** *Criterios de alertas geotécnicas en el tajo:*

<b>Estado</b>	<b>Acciones a realizar</b>
	Alerta crítica: Es una emergencia se debe reportar a todas las áreas planificación y operaciones, evacuándose el sector de riesgo geotécnico.
	Alerta geotécnica: Se señala el progreso de los movimientos, este evento debe ser guiado por el área de geotécnica de la mina e ir comunicando para tomar decisiones.
	Desperfecto en instrumentos: Se debe informar al superintendente que los sensores han fallado y no hay monitoreo, se evalúa su reparación.
	Funcionando todos los sensores y sistemas, además los movimientos en los taludes de la mina están por debajo de los parámetros de alerta.

Fuente: (Cruces, 2014).

✓ **Mapas de riesgos, alertas y reportes automáticos**

En base a los datos procesados y los umbrales ingresados por los usuarios del área de geotecnia por cada sensor de monitoreo, el sistema genera automáticamente los mapas de riesgos y alertas tempranas:

• **Módulo de Mapa 2D y DTM:** En este ambiente se presentan en 2D y 3D los mapas con todos los sensores de monitoreo, sobre el cual muestra por colores las zonas de riesgos calculadas por el sistema.

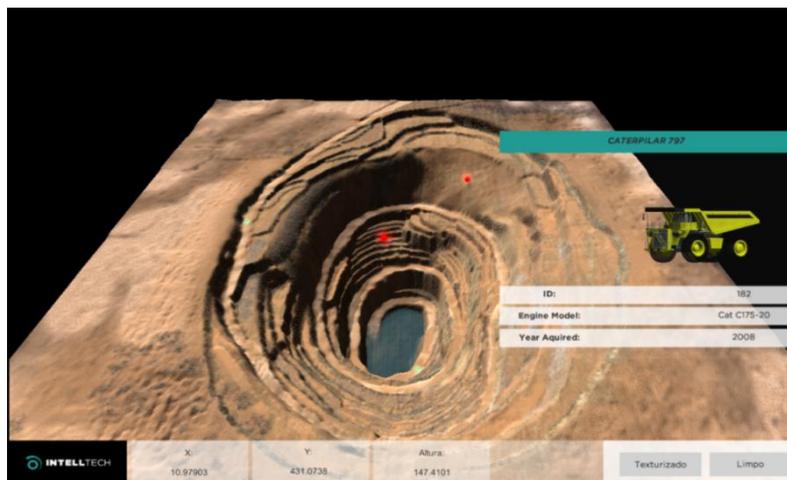
• **Módulo de Realidad Aumentada:** La realidad aumentada permite al usuario visualizar los instrumentos y sus medidas en la pantalla de una Tablet o celular, cuando se apunta la cámara a la estructura, como se muestra en la figura 32 (IntellTech, 2017).



Fuente: IntellTech

**Figura 1.32:** Realidad aumentada para visualización de instrumentos.

• **Módulo de Realidad Virtual:** Permite al usuario explorar la estructura, sin necesidad de transitar por ella. En un entorno virtual, son representados los activos de la empresa, siendo posible visualizarlos en tiempo real, además de verificar sus estados. Por ejemplo, en la figura siguiente, los camiones equipados con dispositivo GPS son representados por puntos verdes moviéndose sobre el tajo de una mina. Al seleccionarlo, es posible verificar las informaciones relacionadas a él, las cuales pueden variar de acuerdo a los sensores equipados en cada activo (IntellTech, 2017).



Fuente: IntellTech

**Figura 1.33:** Realidad virtual control de tránsito en mina

• **Informes:** este módulo permite la generación automatizada de los informes personalizados, en diferentes niveles técnicos y de gerencia. Diversos tipos de filtros pueden ser aplicados por ejemplo, por periodo de realización de las actividades, por instrumento, por área – para generar un informe. Cualquier información generada por los módulos mencionados anteriormente, que no estén registradas previamente se pueden incorporar (IntellTech, 2017).

• **Módulo de Sala de Control de Monitoreo 24/7:** Una Sala de Monitoreo Integrado 24/7 proporciona al gestor la capacidad de monitoreo continuo de la operación de sus estructuras a través de instrumentos y de inspecciones visuales periódicas. El objetivo máximo de esta estructura es el de identificar, inmediatamente, las anomalías que pueden traer consecuencias no deseadas para el proyecto y tomar las medidas necesarias para corrección de estas situaciones. El perfecto funcionamiento de una Sala de Monitoreo 24/7 requiere de técnicos especialistas en sus respectivas funciones: obtención de datos de instrumentación e inspecciones, análisis de datos, entre otros; y el establecimiento de procedimientos de respuesta apropiados (IntellTech, 2017).



Fuente: IntellTech

**Figura 1.34:** Sala de control de monitoreo

#### 1.3.1.4 Dimensiones e indicadores del sistema de monitoreo

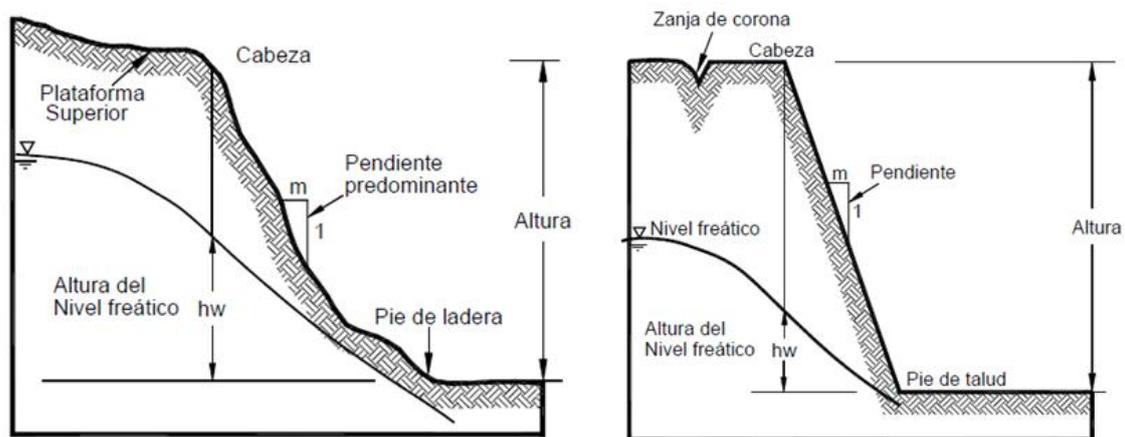
La variable independiente de este estudio, se mide y analiza, con la finalidad de lograr los objetivos propuestos, para lo cual se divide en las siguientes dimensiones e indicadores:

- ✓ **Dimensión 1:** Procedimientos para implementar el sistema de monitoreo  
Indicadores: Establecer las estrategias de monitoreo. Sistemas de comunicación. Criterios de ubicación de los sensores, parámetros de medicación y parámetros de control para analizar los movimientos.
- ✓ **Dimensión 2:** Características de los sensores de monitoreo.  
Indicadores: Determinar las características de los sensores. Tipos de sensores de acuerdo a los movimientos. Técnicas de monitoreo.
- ✓ **Dimensión 3:** Generar mapas de riesgos  
Indicadores: Módulos del sistema integral. Umbrales de alertas. Generación de mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes automáticos.

### 1.3.2 Comportamiento de los taludes en los macizos rocosos

“La ingeniería geotécnica es la rama de la ingeniería civil que enfoca su estudio en las propiedades mecánicas e hidráulicas de suelos y rocas, tanto en superficie como en el subsuelo” (Braja, 2014, p.1).

La pendiente o talud, es cualquier terreno inclinado en relación a su horizontal, esta condición de la estructura de suelo o roca puede ser temporal o permanente, pudiendo ser natural o artificial este último por las actividades del hombre en las obras de ingeniería. En el caso de los naturales pueden ser de erosión o acumulación, llamados “laderas” y de conformación artificial como cortes y terraplenes, denominados “taludes” (Suarez, 2009, p.3).



Fuente: IntellTech

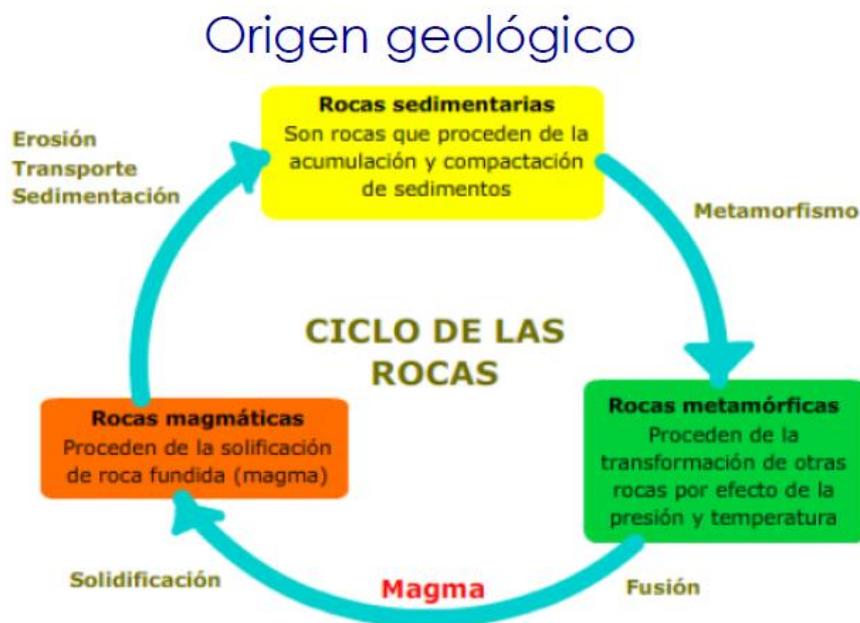
**Figura 1.35:** Gráfica de ladera y talud

En las explotaciones mineras a tajo abierto se edifican artificialmente taludes con la máxima pendiente que pueda soportar el terreno y manteniendo las condiciones de estabilidad (González de Vallejo et al., 2002, p.430).

Las estructuras rocosas son complicadas a diferencia de los suelos, mediante su apariencia homogénea y sólida, ocultan anisotropías originadas por grietas, discontinuidades y planos de fracturas que generan que su comportamiento mecánico no sea el esperado (Bañón y Bevia, 2000, p.17.12).

Con la detección de los factores condicionantes y desencadenantes que influyen en el equilibrio de los taludes en roca, se puede definir que el comportamiento de taludes en macizos rocosos, son actividades complicadas que

sucedan en el talud en base a los factores que gobiernan su estabilidad. Los suelos son materiales meteorizados sueltos o poco consolidados de origen mineral; mientras que la roca es un material natural resistente, consolidado que ha de ser removido mediante voladura, en mecánica de suelos se indica que la resistencia a la compresión uniaxial es la diferencia o la línea que separa a las dos estructuras, siendo esta de 0.25 MPa. De acuerdo a su textura, características, composición y su origen geológico las rocas se pueden organizar en tres grupos: rocas ígneas, rocas metamórficas y rocas sedimentarias (González de Vallejo et al., 2002).



Fuente: Qualicon Latam, 2015

**Figura 1.36:** Origen geológico de las rocas

✓ **Matriz rocosa, discontinuidades y macizo rocoso**

- Matriz rocosa: es un bloque de roca intacta o es el elemento intacto sin discontinuidades (González de Vallejo et al., 2002).
- Discontinuidad: Plano que separa los bloques de matriz rocosa en el macizo rocoso (González de Vallejo et al., 2002).
- Macizo Rocoso: Grupo de matriz rocosa y de discontinuidades que afectan al medio rocoso, prácticamente presentan una resistencia a la tracción nula. El macizo rocoso mecánicamente es un entorno heterogéneo, anisótropo y discontinuo (González de Vallejo et al., 2002).

**Anisotropía:** Presenta diferentes propiedades y comportamiento mecánico en todas las direcciones (González de Vallejo et al., 2002).

**Discontinuidad:** La presencia de discontinuidades quiebra la continuación de las propiedades mecánicas de los macizos rocosos, dando un comportamiento geomecánico diferente al macizo (González de Vallejo et al., 2002).

**Heterogeneidad:** Zonas de diferente litología, meteorización, contenido de agua, entre otras, pueden presentar propiedades diferentes (González de Vallejo et al., 2002).

✓ **Propiedades físicas y mecánicas de las rocas**

La composición mineralógica, cronología geológica, fábrica, deformaciones y ambiente, así como los procedimientos de meteorización y alteración definen las propiedades físicas de las rocas, siendo estas las que precisan el comportamiento mecánico de las rocas. El comportamiento de forma elástica y frágil de un granito sano frente a elevados esfuerzos es diferente a una lutita o margita que presenta un comportamiento dúctil ante cargas bajas o moderadas. La cuantificación de las propiedades se realiza mediante técnicas específicas y ensayos de laboratorio, ver tabla 4 (González de Vallejo et al., 2002, p.125).

**Tabla 1.4:** *Propiedades de la matriz rocosa y métodos para su determinación*

	<b>Propiedades</b>	<b>Métodos de determinación</b>	
<b>Propiedades de identificación y clasificación</b>	Composición mineralógica. Fábrica y textura. Tamaño de grano. Color.	Descripción visual. Microscopía óptica y electrónica. Difracción de rayos X.	
	Porosidad (n).	Técnicas de laboratorio.	
	Peso específico (y).		
	Contenido en humedad.		
	Permeabilidad (k).	Ensayos de permeabilidad	
	Durabilidad. Alterabilidad	Ensayos de alterabilidad	
	<b>Propiedades Mecánicas</b>	Resistencia a compresión simple	Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de carga puntual. Martillo Schmidt.
		Resistencia a tracción	Ensayo de tracción directa. Ensayo de tracción indirecta.
Resistencia (parámetros $c$ y $\phi$ ).		Ensayo de compresión triaxial.	
Deformabilidad (módulos de deformación elástica estáticos o dinámicos: $E$ , $\nu$ ).		Ensayo de compresión uniaxial. Ensayo de velocidad sónica.	
Velocidad de ondas sísmicas		Medida de velocidad de ondas elásticas en laboratorio.	

Fuente: (González de Vallejo et al., 2002, p.127)

Las propiedades físicas de las rocas se definen en laboratorio; siendo las más importantes a nivel de influencia en la conducta mecánica las siguientes:

- La porosidad: Es el vínculo entre el volumen total de una roca y el volumen de huecos. Depende únicamente de la composición de la roca o suelo, siendo un parámetro adimensional (QUALICON Latam, 2015).
- El peso unitario o específico: Relación entre el peso total de la roca en el aire sobre el volumen total de la roca (QUALICON Latam, 2015).
- La permeabilidad: Es la capacidad de la roca de transmitir agua, las permeabilidades de las rocas son bajas o muy bajas (QUALICON Latam, 2015).

- La durabilidad: Es la fuerza que presenta la roca ante procedimientos de desintegración y alteración. Los procesos que cambian las propiedades del material rocoso son: la disolución, la hidratación, la oxidación, entre otras (González de Vallejo et al., 2002, p.129).

La fuerza o resistencia y la deformabilidad definen el comportamiento mecánico de las rocas. El esfuerzo o resistencia que aguanta una roca genera las deformaciones. La compresión uniaxial o simple se determina cuando la resistencia se define en probetas de rocas sin confinar y resultado se utiliza en la clasificación geomecánica de las rocas. Las fuerzas cohesivas y friccionales determinan la resistencia. A la fuerza de enlace entre particular minerales de conforman la roca se denomina cohesión  $c$ . El ángulo de rozamiento entre dos planos de la misma roca, se llama ángulo de fricción interna  $\phi$ , pudiendo variar entre  $25^\circ$  y  $45^\circ$ . La  $c$  y  $\phi$ , no solo definen la resistencia de la roca, existen otros valores como la presencia de agua en los poros, la magnitud de los esfuerzos confinantes y la velocidad de aplicación de la carga de rotura (González de Vallejo et al., 2002).

En la tabla 5 se indican valores de la cohesión y ángulo de fricción de la matriz rocosa. Estos parámetros se definen en laboratorio a partir del ensayo de compresión triaxial.

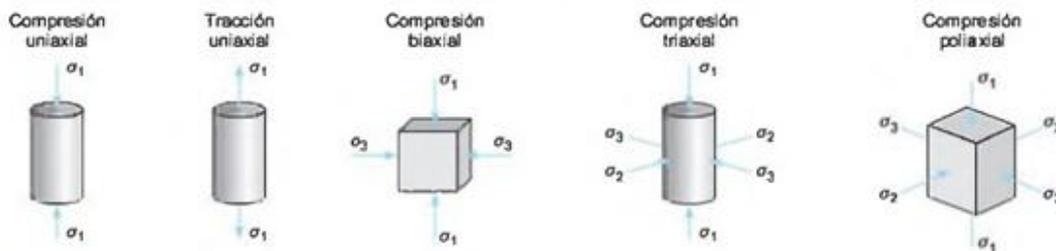
**Tabla 1.5:** Valores de cohesión y ángulo de fricción de algunas rocas

Rocas	Cohesión $c$ (kp/cm <sup>2</sup> )	Angulo de fricción básico $\phi$ (grados)
<b>Ígneas</b>		
Basalto	200 - 600	48 – 55
Diabasa	900 - 1200	40 – 50
Diorita	150	50 – 55
Gabro	300	35
Granito	150 - 500	45 – 58
<b>Sedimentarias</b>		
Caliza	40 - 400	35 – 50
Arenisca	80 - 350	30 – 50
Yeso	---	
<b>Metamórficas</b>		
Mármol	150 - 350	35 – 45
Cuarcita	250 - 700	40 – 55
Esquisto	20 - 150	20 – 30
Pizarra	100 - 500	40 – 55

Fuente: (González de Vallejo et al., 2002)

### 1.3.2.1 Ensayos de laboratorio de resistencia y deformabilidad

La definición de la resistencia y la deformabilidad de las rocas se realizan mediante métodos experimentales, los cuales son independientes del criterio de rotura de cada caso; su fin es obtener los parámetros de resistencia al cortante, mediante los ensayos más comunes de compresión triaxial y de corte directo (Suarez, 2009, p.476).



Fuente: (González de Vallejo et al., 2002, p.150)

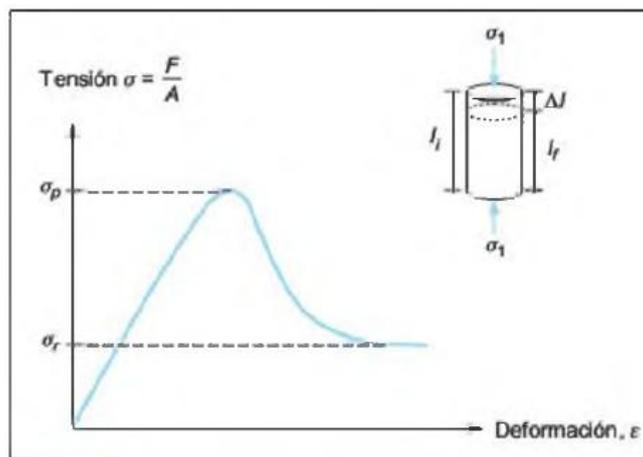
**Figura 1.37:** Esfuerzos a los que son sometidos los testigos en laboratorio

- ✓ **Ensayo de compresión simple o uniaxial:** Clasifica a la roca por su resistencia y determinar su deformabilidad, encontrando la resistencia a la compresión simple o resistencia uniaxial no confinada de la roca y sus constantes elásticas, como el módulo de Young y coeficiente de Poisson. El vínculo entre los esfuerzos aplicados en el ensayo son:  $\sigma_1 \neq 0$ ;  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  (González de Vallejo et al., 2002, p.165).
  
- ✓ **Ensayo de tracción directa:** Directamente calcula la resistencia a tracción uniaxial de un cilindro de roca. Es importante sujetar los extremos de la probeta y aplicar una fuerza traccional uniaxial en la dirección de la mayor longitud de la probeta, hasta obtener su rotura (González de Vallejo et al., 2002, p.167).
  
- ✓ **Ensayo brasileño o de tracción indirecta:** Se determina la resistencia a tracción uniaxial de una probeta de roca indirectamente, ya que la rotura se genera por tracción cuando a la roca se le ejerce un estado de esfuerzos biaxiales, mediante un esfuerzo principal traccional y otro compresivo de magnitud no superior a tres veces el esfuerzo traccional (González de Vallejo et al., 2002, p.174).
  
- ✓ **Ensayo de compresión triaxial:** Es el ensayo más completo que hay en ingeniería ya que busca igualar las condiciones de campo tanto para las muestras de suelo y roca, a las cuales se le ejercen esfuerzos confinantes, mediante la presión hidráulica uniforme alrededor de la probeta. Determina la línea de resistencia del material rocoso ensayado o envolvente, obteniéndose los valores de los parámetros de resistencia fricción  $\phi$  y cohesión  $c$ . El vínculo entre los esfuerzos ejercidos a la probeta es:  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \neq 0$  (González de Vallejo et al., 2002, p.170).

### 1.3.2.2 Resistencia, mecanismos de rotura, deformabilidad y criterios de rotura de la matriz rocosa.

Los macizos rocosos, presentan fallas o discontinuidades de distintos tipos y sectores meteorizadas, por lo que sus propiedades mecánicas y físicas son anisótropas, heterogéneas y discontinuas, gobernando la respuesta mecánica de la roca frente a la aplicación de fuerzas. Las fuerzas ejercidas dan lugar a transformaciones en el estado mecánico de los macizos rocosos, generando muchas consecuencias internas, como deformaciones (cambio en la forma de un cuerpo), desplazamientos (cambio en la posición de una partícula y queda definido por un vector), y alteración en el estado tensional o esfuerzos de un sistema, siendo las fuerzas las responsables primarias del estado y comportamiento mecánico de un sistema. Los ensayos de laboratorio aplican fuerzas para producir la rotura del material y determinar sus propiedades deformacionales y de resistencia (González de Vallejo et al., 2002).

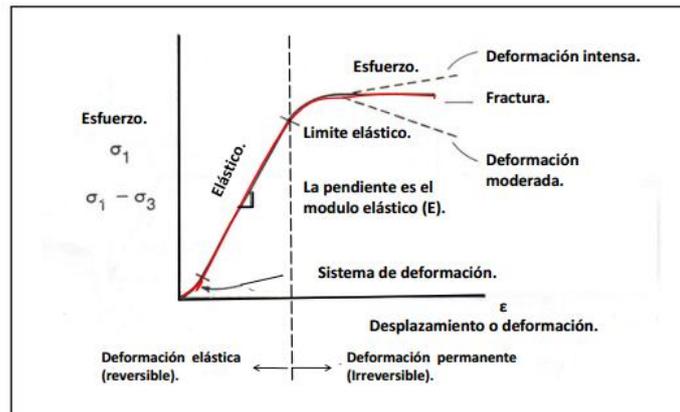
✓ **La resistencia:** Es la cantidad de esfuerzo que puede soportar la roca para ciertas condiciones de deformación. La resistencia de pico ( $\sigma_p$ ), esfuerzo máximo que se puede alcanzar y genera la deformación de pico. La resistencia residual ( $\sigma_r$ ), es la cantidad que disminuye la resistencia cuando se deforma sin carga.



Fuente: (González de Vallejo et al., 2002)

**Figura 1.38:** Diagrama de la cámara para ensayos triaxiales.

Naturalmente, la resistencia se basa a las propiedades intrínsecas de la roca, ángulo de fricción y cohesión, así como a otros factores externos como la dimensión de los esfuerzos que dan, los periodos de carga y descarga o la existencia de agua. Por lo tanto se puede decir que la resistencia no es un valor único intrínseco de la roca y por esto el interés de saber su valor y sus variaciones para determinadas las condiciones de los materiales rocosos (González de Vallejo et al., 2002).

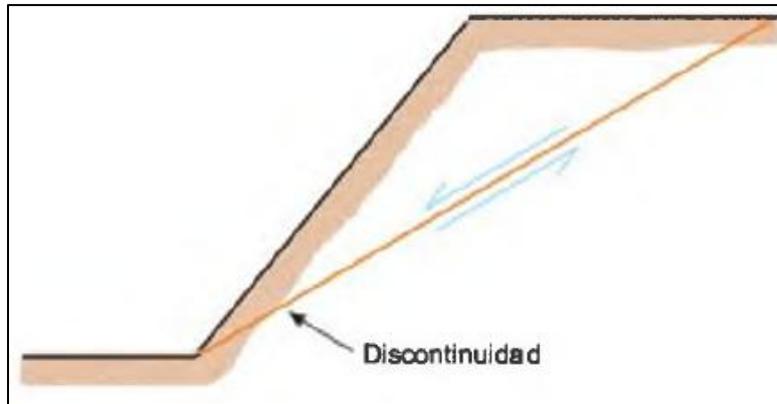


Fuente: (González de Vallejo et al., 2002)

**Figura 1.39:** Grafica de las curvas de esfuerzo-deformación.

- **La meteorización:** Es la descomposición superficial de los materiales geológicos, mediante alteraciones químicas y físicas que cambian las propiedades y características de los materiales, además conlleva a la pérdida de resistencia y genera mayor permeabilidad (González de Vallejo et al., 2002, p.135).
- **La fractura:** Son los planos de separación en la roca, que se forman al romperse los enlaces de las partículas para desarrollar nuevas superficies. Se pierden las fuerzas cohesivas y quedan solo las friccionales (González de Vallejo et al., 2002, p.135).
- **La rotura:** Fenómeno que se genera cuando la roca no puede soportar las fuerzas aplicadas, llegando el esfuerzo a un valor máximo equivalente a la resistencia de pico del material (González de Vallejo et al., 2002, p.150).
- ✓ **Mecanismos de rotura:** Estos procesos son complejos y variados ya que intervienen muchos factores, siendo más complejos en roca que en suelo los mecanismos de rotura. Entre los diferentes mecanismos rotura tenemos: por compresión, por flexión, por tracción, por colapso, siendo el mecanismo de rotura por esfuerzo cortante el que hace fallar a la roca (QUALICON Latam, 2015).

- **Rotura por esfuerzo cortante:** Parte de la superficie de la roca se somete a esfuerzos de corte muy elevados para que parte de la superficie deslice con respecto a la otra.



Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

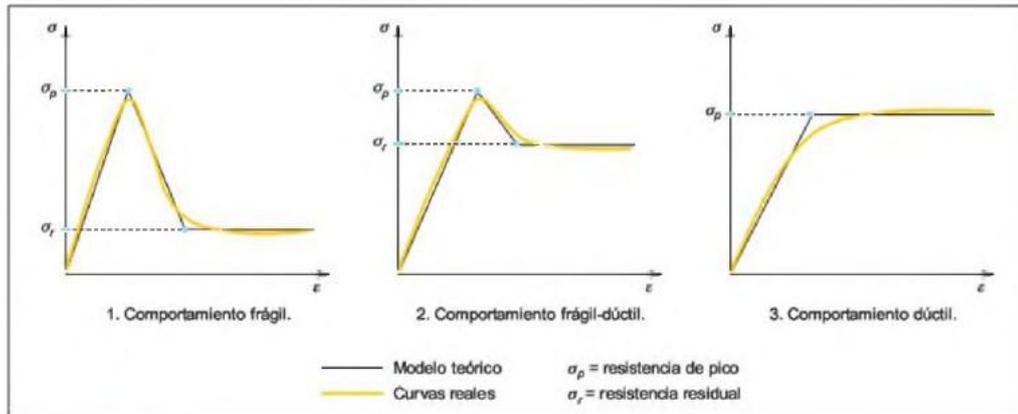
**Figura 1.40:** Rotura por esfuerzo cortante de un talud.

- **Relaciones de esfuerzo – deformación en las rocas:** Es el vínculo entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones desarrolladas en un material, es decir es la variación de la resistencia del material para determinar los niveles de deformación (Ramirez y Alejano, 2004). Cuando la carga sobre un cuerpo rocoso sobrepasa su resistencia de pico puede ocurrir:

**Comportamiento frágil:** La resistencia disminuye drásticamente incluso hasta alcanzar un valor próximo a cero; conlleva a una pérdida casi instantánea de la resistencia de la roca mediante un plano con muy poca o sin ninguna deformación plástica, un ejemplo es el vidrio y también las rocas duras con alta resistencia (QUALICON Latam, 2015).

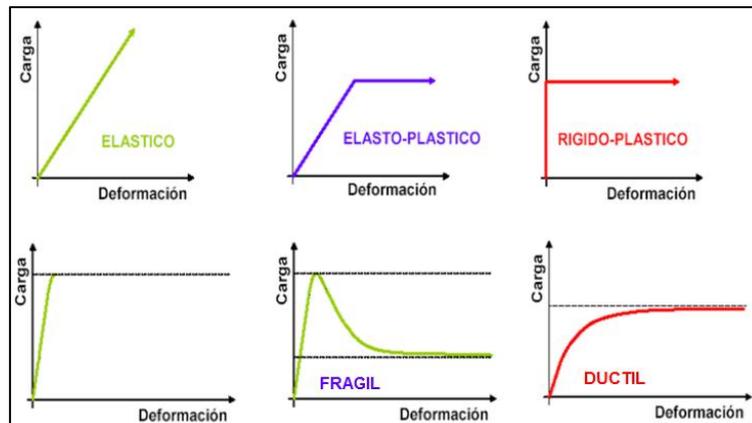
**Comportamiento frágil – dúctil:** Baja la resistencia de la roca hasta un cierto valor luego de alcanzarse deformaciones importantes, se presenta en las discontinuidades rocosas o materiales arcillosos sobre consolidados (QUALICON Latam, 2015).

**Comportamiento dúctil:** La deformación continúa aumentando sin perder la resistencia, es decir mantiene constante la resistencia luego de grandes deformaciones, suele presentarse en materiales blandos como las sales (QUALICON Latam, 2015).



Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

**Figura 1.41:** Modelo de comportamiento tensión-deformación.



Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

**Figura 1.42:** Comportamiento tensión-deformación.

✓ **Deformabilidad:** Es una propiedad que altera la forma de la roca como consecuencia de la aplicación de fuerzas. Se expresa mediante el coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad.

- **Comportamiento Lineal o Elástico:** La línea que sube en el diagrama de esfuerzo deformación, antes de llegar a la resistencia de pico, muestra un comportamiento lineal o elástico en la mayoría de las rocas. En la zona elástica, la deformación es proporcional al esfuerzo y se cumple la relación  $E = \sigma/\epsilon_{ax}$  (Suarez, 2009).

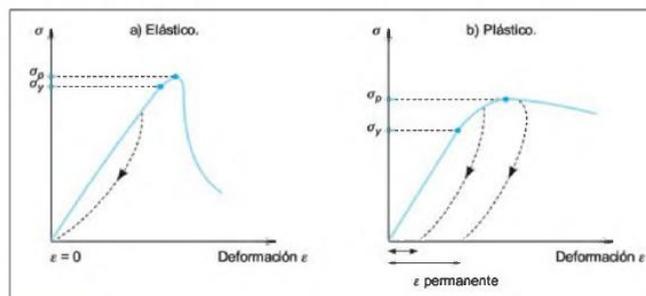
Siendo E el módulo de Young o módulo de elasticidad.  $\sigma$  es el esfuerzo y  $\epsilon_{ax}$  es la deformación axial (en la dirección de la fuerza aplicada). Hay otra constante que determina con el valor de E el comportamiento elástico del material rocoso, llamada coeficiente de Poisson  $\nu = \epsilon_l/\epsilon_{ax}$ , donde  $\epsilon_l$  es la deformación transversal de la probeta de roca ensayada (González de Vallejo et al., 2002, p.153).



Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

**Figura 1.43:** Ley de Hooke: Deformación elástica – plástica.

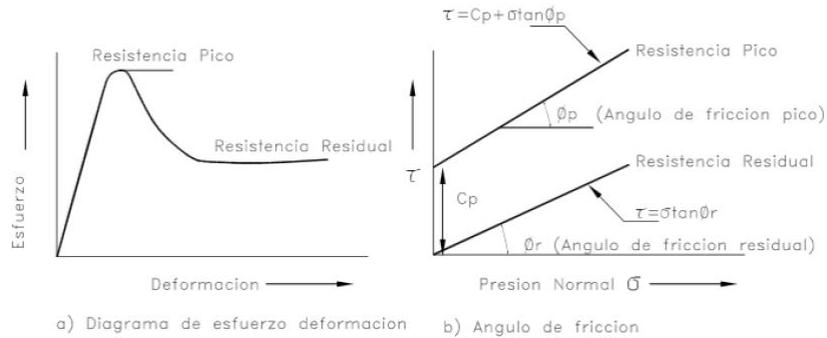
- **Plasticidad:** Es la propiedad de un material para permanecer permanentemente deformado. Existen dos tipos de plasticidades: flujo plástico y punto de fluencia, la primera se refiere al fenómeno de incremento de deformación a esfuerzo constante y el segundo es el punto donde termina la deformación elástica y ocurren deformaciones permanentes sin necesidad de fracturas.



Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

**Figura 1.44:** Comportamiento elástico y plástico.

- **Resistencia y deformabilidad de la matriz rocosa:** La resistencia y su deformabilidad definen el comportamiento mecánico de las rocas. La resistencia de la roca no es un valor único, porque además de los valores de  $c$  y  $\phi$ , necesita de otros factores, como la presencia de agua en los poros o la magnitud de los esfuerzos confinantes (González de Vallejo et al., 2002, p.158).



Fuente: (Suarez, 2009)

**Figura 1.45:** Comparación entre esfuerzo deformación y resistencia

✓ **Criterios de rotura de la matriz rocosa**

Los criterios de rotura de Mohr-Coulomb y de Hoek and Brown, evalúan la resistencia de la matriz rocosa isótropa. La principal desigualdad en ambos es que uno tiene un criterio lineal y el otro un criterio no lineal (QUALICON Latam, 2015).

- **Criterio de Mohr Coulomb:** Obtiene el vínculo entre el esfuerzo normal y tangencial que actúan al momento de la rotura, de acuerdo a la resistencia al corte a lo largo de un plano en un estado triaxial de tensiones (QUALICON Latam, 2015).

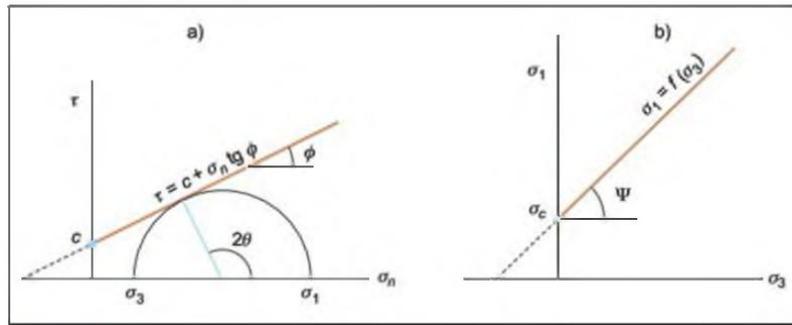
$$\tau = c + \sigma_n \tag \phi$$

Donde:

$c$  es la cohesión.

$\phi$  es el ángulo de fricción.

$T$  es el esfuerzo tangencial que actúa en el plano de rotura.



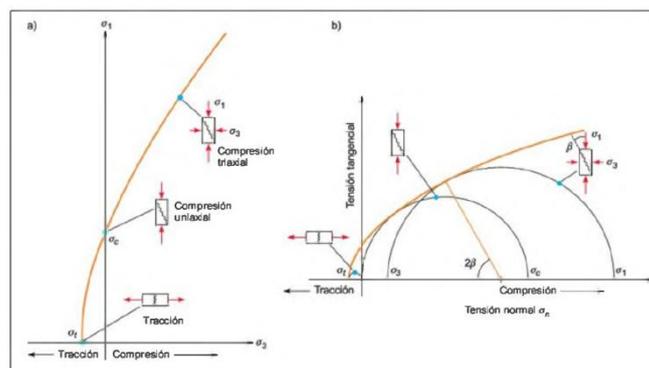
Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

**Figura 1.46:** Envolventes de Mohr-Coulomb, tangenciales y normales

- **Criterios de rotura de Hoek and Brown:** Este criterio usa una curva tipo cóncavo como representación gráfica de la rotura, con la finalidad de evaluar la resistencia de la matriz rocosa de una no lineal. Hoek and Brown (1980) propusieron su criterio empírico para que en condiciones triaxiales la rotura no lineal valida evalúe la resistencia de la matriz rocosa isótropa (González de Vallejo et al., 2002, p.161).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5}$$

Donde:  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  son los esfuerzos principales menor y mayor en rotura,  $\sigma_{ci}$  es la resistencia a compresión uniaxial o simple de la matriz rocosa, m y s son constantes que depende de las propiedades de la matriz rocosa. s es un parámetro de disminución de la resistencia a compresión uniaxial o simple de la roca debido a la fracturación, ambos parámetros se pueden obtener de la clasificación geomecánica Rock mass rating (RMR) (González de Vallejo et al., 2002, p.162).



Fuente: (González de Vallejo et al., 2002, p.162).

**Figura 1.47:** Envolventes de rotura de Hoek and Brown aplicado a la roca

### 1.3.2.3 Discontinuidades, tipos, características, resistencia al corte y dilatación en el macizo rocoso

En la naturaleza los macizos rocosos, presentan comúnmente un gran número de discontinuidades, condicionando definitivamente las propiedades y el comportamiento de la resistencia, deformabilidad e hidráulico. Las discontinuidades son planos de alteración, meteorización y fractura. Las discontinuidades son fisuras o canales que se encuentran en la roca y por donde circula el agua disminuyendo la resistencia del macizo rocoso. Las excavaciones o explotación de la mina dependen de la orientación y resistencia de las discontinuidades. Cabe precisar que se deben tomar en cuenta la resistencia de la matriz rocosa y la resistencia de las discontinuidades ya que en conjunto dan la resistencia del macizo rocoso. Para el diseño se debe tomar en consideración de las dos resistencias, la de menor grado o menor valor de resistencia, es por esta razón que se estudia las discontinuidades independientes de la matriz rocosa. En el estudio de las discontinuidades hay que tener en cuenta, su orientación, persistencia e inclinación (Ramirez y Alejano, 2004).

✓ **Tipos de discontinuidades:** Cualquier plano de separación en un macizo rocoso, se considera una discontinuidad, pudiendo tener origen sedimentario, metamórfico o ígneo, entre los tipos de discontinuidades se pueden indicar (QUALICON Latam, 2015).

**Tabla 1.6:** *Tipos de discontinuidades*

<b>Discontinuidad</b>	<b>Singulares</b>	<b>Sistemáticas</b>
<b>Planares</b>	Fallas Diques Discordancia	Planos de estratificación Planos de laminación Diaclasas Planos de esquistosidad
<b>Lineales</b>	Eje de pliegues	Intersección de discontinuidades planares lineales

Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

✓ **Características de las discontinuidades:** En un proyecto minero se tiene que realizar un inventario de los tipos de rocas, así como de las familias de discontinuidades y sus características, las cuales ya están estipuladas:

- **Orientación:** Es la descripción del rumbo y buzamiento de la posición en el espacio de la discontinuidad. Cuando las discontinuidades se encuentran con similar orientación o de forma casi paralelas se dice que están formando una familia o sistemas de discontinuidades. Esta labor se realiza en campo con una brújula, determinándose el rumbo que es la dirección de la discontinuidad con respecto al norte o sur y el buzamiento que es un ángulo que se mide con respecto a una línea horizontal (Suarez, 2009).
- **Espaciado:** Es la determinación de la distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes, permitiendo determinar la dimensión de los bloques de roca intacta (Ramírez y Alejano, 2004).
- **Persistencia:** Es la longitud de toda la discontinuidad, si la persistencia es menor la masa rocosa será más estable (QUALICON Latam, 2015).
- **Rugosidad:** Es la irregularidad o aspereza en la superficie de las discontinuidades. En caso la rugosidad sea mayor, será más competente la masa rocosa (QUALICON Latam, 2015).
- **Apertura:** Es el grado de separación entre las paredes rocosas de las discontinuidades. Si la apertura es menor las condiciones rocosas son mejores, en caso contrario las condiciones son desfavorables (QUALICON Latam, 2015).
- **Relleno:** Son los materiales que se hallan dentro de las discontinuidades. La masa rocosa es más competente cuando los materiales son duros, en caso contrario es menos competente (QUALICON Latam, 2015).

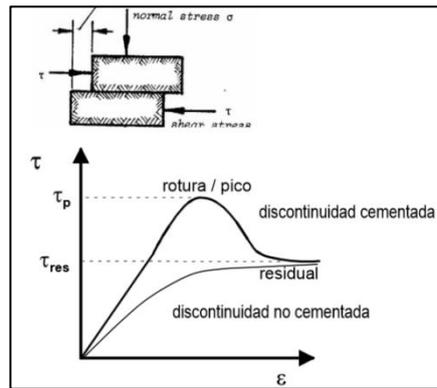


Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

**Figura 1.48:** Características de las discontinuidades

- ✓ **Resistencia al corte de los planos de discontinuidades:** La resistencia de corte de las discontinuidades está determinada por la fricción de planos y en menor proporción por la cohesión. Otro factor que influye en la resistencia friccional de las discontinuidades es la rugosidad de las paredes.

- **Resistencia al corte en discontinuidades planas**

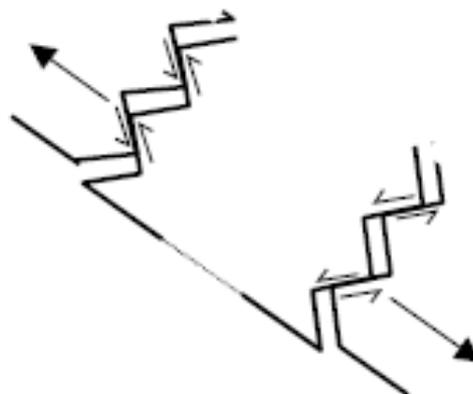


Fuente: (Ramírez y Alejano, 2004)

**Figura 1.49:** Gráfica de corte de discontinuidades planas

El criterio de rotura para las discontinuidades planas es dada por Mohr Coulomb y deben cumplir condiciones como la superficie de la discontinuidad debe estar completamente plana y la muestra debe estar sujeta a una tensión normal (QUALICON Latam, 2015).

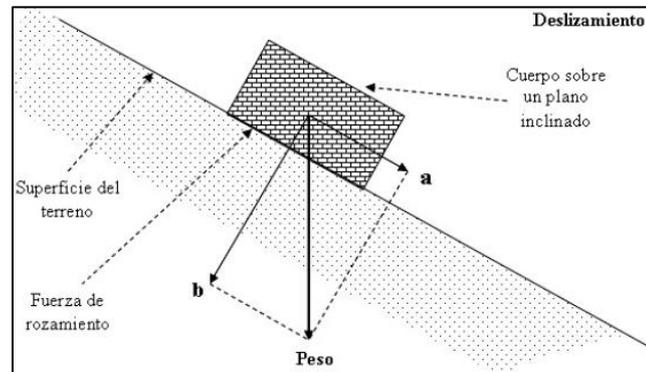
✓ **Dilatancia:** Es la relación entre el desplazamiento horizontal y el desplazamiento vertical en un punto de una discontinuidad durante un proceso de corte. Surge a partir del contacto directo de partículas y en el momento que una de las fuerzas hace que se desprenda un cuerpo (Ramírez y Alejano, 2004, p.101).



Fuente: (Ramírez y Alejano, 2004, p.102)

**Figura 1.50:** Dilatancia

- **Resistencia al corte de las discontinuidades rugosas:** Existen tres métodos para definir la resistencia al corte de las discontinuidades rugosas, siendo estos: Patton (1966), Barton (1976) y Barton and Choubey (Instituto Geológico y Minero de España, 1986).



Fuente: (Ramírez y Alejano, 2004)

**Figura 1.51:** Gráfica de deslizamiento sobre un plano inclinado

- **Método de Barton y Choubey:** Las discontinuidades en la naturaleza se presentan comúnmente rugosas, siendo esta muy irregular. El comportamiento de la resistencia pico de juntas rugosas naturales sin relleno han sido analizadas por Barton en detalle, proponiendo la ecuación que describe dicho comportamiento de la siguiente forma (Ramírez y Alejano, 2004, p.87):

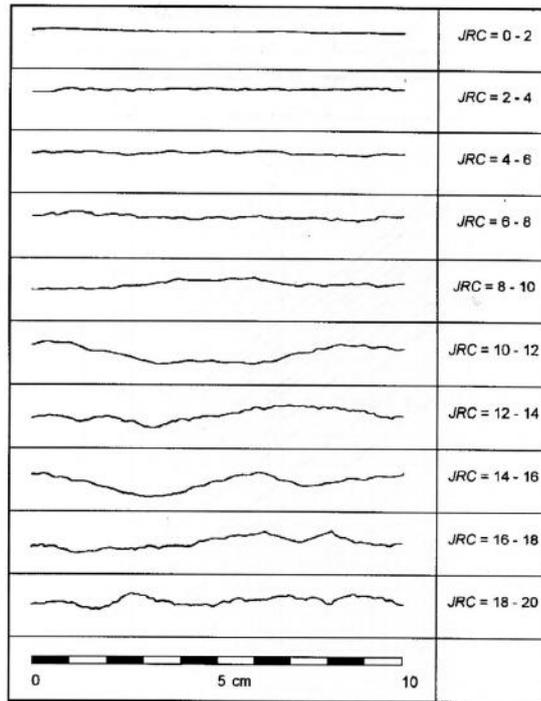
$$\tau = \sigma_n \cdot \text{tg} \left[ \phi_r + JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

Donde:

$\phi_r$ : es el ángulo de fricción residual, se calcula con el martillo Schmidt.

JRC: Coeficiente de rugosidad de la junta, se pueden determinar con los perfiles establecidos por Barton y Choubey en 1977.

JCS: La resistencia a la compresión uniaxial o simple de las paredes de la discontinuidad (se usa el martillo Schmidt).



Fuente: (Ramirez y Alejano, 2004, p.88)

**Figura 1.52:** Perfiles de Barton y Choubey.

### Consideraciones generales de las discontinuidades

Las discontinuidades tendrán un determinado comportamiento al ser excavada de acuerdo a las características del macizo rocoso, siendo éstas:

La masa rocosa será competente y presentará condiciones favorables cuando sea excavada, si la roca intacta es resistente o dura y las discontinuidades tienen propiedades favorables.

La masa rocosa será incompetente y presentará condiciones desfavorables cuando sea excavada, si la roca intacta es débil o de baja resistencia y las discontinuidades presentan propiedades desfavorables.

Se presentan situaciones intermedias entre los extremos mencionados cuando la roca tendrá condiciones regulares cuando sea excavada (QUALICON Latam, 2015).

Antes de hacer un proyecto de gran envergadura se debe tener en claro todo el panorama como:

- Las características de la matriz rocosa.
- Las características y orientación de las discontinuidades.

En base a ellas determinar la resistencia del macizo rocoso, es preciso indicar que los criterios de rotura a tener en cuenta son:

**Tabla 1.7: Criterios de rotura**

Características	Criterio de Rotura	Datos necesarios
<b>Matriz rocosa</b>	Hoek and Brown	$m_i$ y $\sigma_c$ de la roca matriz
<b>Discontinuidades</b>	Mohr-Coulomb	$c'$ y $\phi'$ de la junta
	Barton-Choubey	$\phi_b$ , JRC, JCS de la junta
<b>Macizo rocoso</b>	Hoek and Brown	$m$ y $s$ hallar con GSI

Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

#### 1.3.2.4 Estabilidad de taludes en el macizo rocoso.

En minería el diseño de taludes depende de la profundidad y disposición del yacimiento, así como los criterios económicos. Los análisis de estabilidad determinan el diseño de los taludes, por medio del cálculo del factor de seguridad y en el caso existan roturas definir las medidas correctivas o de estabilización (González de Vallejo et al., 2002). También se debe realizar un estudio preliminar, el cual debe incluir:

- Reconocimiento geológico: tipo de rocas, formaciones.
- Calicatas o perforaciones: para conocer el estado de la roca.
- Ensayos de laboratorio.
- Ensayos de campo: bombeo, permeabilidad, esfuerzos

✓ **Factores influyentes en la estabilidad:** Los taludes son sistemas dinámicos en evolución, aunque se presenten aparentemente estables y estáticos. Un deslizamiento es un fenómeno que puede ocurrir en un talud estable el cual puede desestabilizarse con el tiempo (Suarez, 2009, p.38). En consecuencia se necesita identificar detalladamente lo que ocurre dentro de un talud para diagnosticar correctamente su comportamiento.

Es necesario identificar las causas que generan la inestabilidad para diagnosticar el estado de la estabilidad de un talud, con la finalidad de anticipar los cambios que puedan ocurrir en el tiempo, la humedad, drenaje y las condiciones de carga, a las cuales se exponen los taludes en toda su vida los taludes (Suarez, 2009, p.38). Las causas que definen el comportamiento de los talud son las siguientes: a) factores condicionantes: propiedades físicas,

estructura geológica, estratigrafía y litología, condiciones hidrogeológicas, resistencia, deformabilidad, tensiones naturales y estado tenso-deformacionales. b) factores desencadenantes: cargas dinámicas, modificaciones a las condiciones hidrogeológicas, sobrecargas estáticas, factores climáticos, variaciones en la geometría, reducciones de los parámetros resistentes (Instituto Geológico y Minero de España, 1986, p.27).

Para otros autores la inestabilidad de los taludes es causada por: a) factores geológicos, geométricos y geotécnico (zonas de debilidad y anisotropía en el talud, presencia de planos, la altura e inclinación del talud y la conducta mecánica del suelo o roca, resistencia y deformabilidad), b) factores hidrogeológicos (por el nivel freático y la presión de poros) y c) factores climáticos (variación de la humedad, temperatura y precipitaciones). Estos factores tienen relación principalmente con los factores condicionantes y son intrínsecos a los materiales naturales (González de Vallejo et al., 2002, p.433), es por esta razón que las fallas son probabilísticas, por tal motivo se debe prever y por ende monitorear.

✓ **Resistencia y deformabilidad del macizo rocoso:** La resistencia de la matriz rocosa y de las discontinuidades determinan la resistencia de los macizos rocosos, ambas son extremadamente variables, además inciden las condiciones geo ambientales a las que está sometido el macizo, como las tensiones naturales y las condiciones hidrogeológicas (González de Vallejo et al., 2002, p.432).

El comportamiento del macizo rocoso y su resistencia al corte se definen con las siguientes propiedades: a) la resistencia de la matriz rocosa (anisótropa o isótropa), b) la resistencia al corte de una discontinuidad, c) la resistencia al corte de dos o más familias de discontinuidades (las más representativas del macizo) y d) Resistencia global del macizo rocoso (QUALICON Latam, 2015).

Definidos los elementos que controlan la resistencia del macizo, su valoración puede realizarse mediante los siguientes métodos: a) métodos empíricos basados en experiencias y ensayos de laboratorio, b) métodos indirectos basados en índices de calidad (clasificación geomecánica), c) modelaciones matemáticas y análisis a posteriori, d) modelaciones físicas y últimamente se vienen utilizando e) probabilidades (QUALICON Latam, 2015).

✓ **Criterios de rotura en el macizo rocoso, según Hoek and Brown:** Se aplica el criterio de rotura de Hoek and Brown para macizos rocosos isótropos y anisótropos, debiéndose tener en cuenta las siguientes consideraciones: a) criterio no lineal para macizos isótropos, b) m, a y s dependen de características del material, c) aplica cuando se tienen 4 a más sistemas de discontinuidades, d) los resultados deben ser revisados con otros métodos, datos de campo y monitoreo (González de Vallejo et al., 2002, p.160).

**Tabla 1.8:** Resistencia de la roca, cohesión y ángulo de fricción

Clase de roca	I	II	III	IV	V
RMR	>80	61-80	41-60	21-40	<20
Cohesión (MPa)	>0.4	0.3-0.4	0.2-0.3	0.1-0.2	<0.1
Angulo fricción	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	<15°

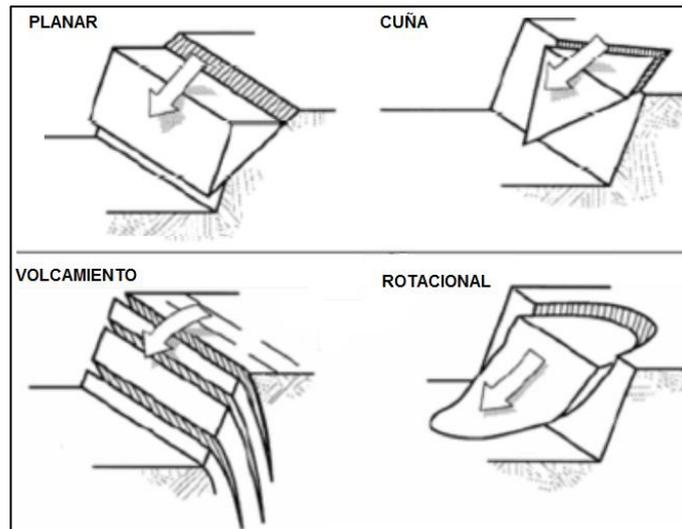
Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

Matríz Rocosa	Macizo Rocoso
$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$	$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$
$\tau = A \sigma_{ci} \left( \frac{\sigma_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}} \right)^u$	<p>a, s y <math>m_b</math> = Constantes para el macizo</p>
$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left( m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right)$	<p><math>\sigma_{ci}</math> = Resistencia compresión</p>
<p><math>\sigma_n</math> = esfuerzo normal</p>	
$\sigma_{tm} = \frac{s * \sigma_{ci}}{m}$ <p><math>\sigma_{tm}</math> = Resistencia a la tensión</p>	

Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

**Figura 1.53:** Criterios de falla para los macizos rocosos

✓ **Tipos de roturas:** Después de haber caracterizado el macizo rocoso teniendo en cuenta los parámetros mecánicos para el diseño de los taludes y definido los mecanismos de rotura, se puede indicar los procesos de deterioro del macizo rocoso siendo estos: caídas de granos, caída de rocas, descascaramiento, flujos de detritos, caídas de bloques, colapsos y caídas de avalanchas. Además los tipos de rotura o mecanismos de falla que se pueden presentar en taludes rocosos son tres: falla planar, cuña, volcamiento o toppling y rotacional (Bañón y Beviá, 2000).



Fuente: (QUALICON Latam, 2015)

**Figura 1.54:** Tipos de rotura

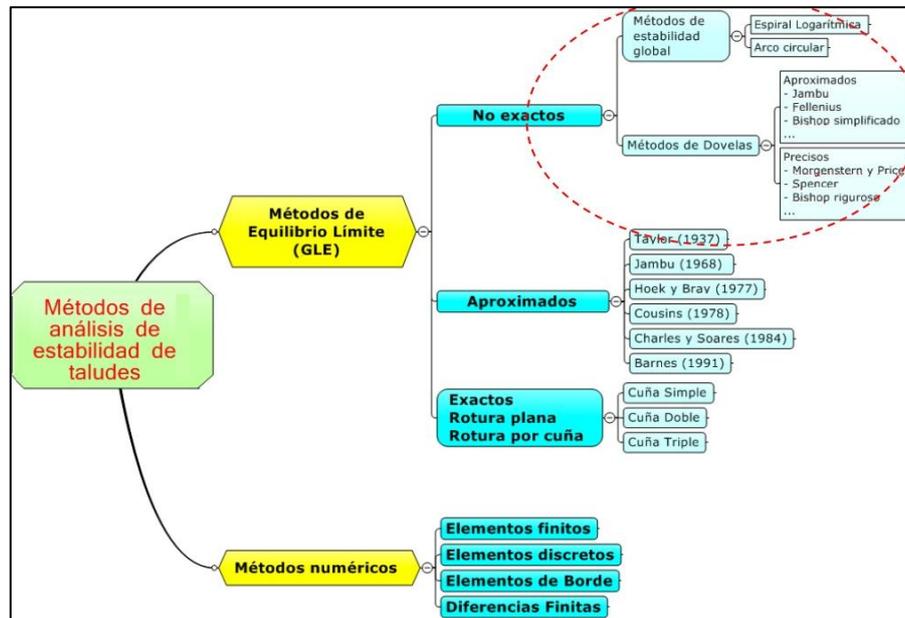
### ✓ **Análisis de estabilidad y diseño de taludes**

La estabilidad de los taludes en lo macizos rocosos depende del análisis y diseño de la estructura de la roca, mientras que estos dependen de la geometría del talud y la relación a la carga producida por la inestabilidad y la resistencia de la roca en contra de la falla (Morales, 2000, p.59).

Para (González de Vallejo et al., 2002, p.445) el análisis de estabilidad se basa en métodos que presentan planteamientos físico-matemático en los que participan las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que intervienen sobre el talud, determinando su comportamiento y condición de equilibrio estricto del talud (es decir,  $F = 1,0$ ) a lo largo de la superficie de rotura, Se pueden agrupar en:

- **Metodología empírica:** por clasificación geomecánica de los macizos rocosos, empleando (RMR, MRMR, SMR, GSI)
- **Método de equilibrio límite:** que es el más utilizado en la práctica de la ingeniería de rocas destinada a minas a cielo abierto. Es una poderosa herramienta para el cálculo del factor de seguridad; pero es tan usada que no son reconocidas sus restricciones.
- **Métodos probabilísticas:** consideran probabilidades de rotura de un talud bajo condiciones determinadas, son técnicas con excelentes resultados en cuanto a la confiabilidad de los datos obtenidos (González de Vallejo et al., 2002, p.445).

- **Métodos numéricos**, que en la última década tuvieron gran avance sobre todo en la computación aplicada a minería e ingeniería.



Fuente: (Ramirez y Alejano, 2004)

**Figura 1.55:** Métodos de análisis de estabilidad de taludes

✓ **Factor de seguridad (FS):** La finalidad de todos los métodos indicados es determinar el factor de seguridad por quien los parámetros de resistencia pueden ser reducidos hasta llevar al talud a un estado de equilibrio límite. El valor numérico para el FS escogido para un diseño particular depende del grado de incertidumbre, para lo cual se deben conocer las siguientes variables: ubicación de la superficie de falla, niveles freáticos del agua, cargas externas y parámetros de resistencia al corte. En conclusión se puede definir el FS como el vínculo o concordancia entre las fuerzas resistentes y las fuerzas desestabilizadoras (González de Vallejo et al., 2002, p.445). Entre los Software para el análisis de estabilidad de rocas tenemos:

- **Plaxis:** de acuerdo al método tensión-deformación y de elementos finitos.
- **Falla en cuña:** Swedge
- **Falla planar:** Rocplane
- **Caída de rocas:** Rocfall

## ✓ **Clasificaciones geomecánicas de los macizos rocosos**

Las clasificaciones geomecánicas para taludes permiten obtener, con correlaciones establecidas, los principales parámetros mecánicos del macizo rocoso como: coeficientes del criterio de rotura Hoek-Brown, módulo de elasticidad, etcétera. Normalmente se debe emplear directamente las clasificaciones geomecánicas para determinar la estabilidad de los taludes en fases iniciales del estudio; pero su empleo es cuestionable como única herramienta de decisión a nivel de todo el proyecto (Bieniawski, 1989).

Las clasificaciones más empleadas son: Bieniawski (RMR), Barton, Lien y Lunde (Q) y Hoek and Brown (GSI). Las dos primeras utilizan un parámetro, RQD (Rock Quality Designation), que son la base de la clasificación de Deere (Ramírez y Alejano, 2004, P.147).

Para (González de Vallejo et al., 2002, p.132) las clasificaciones de los macizos rocosos se basan a algún o varios factores que definen su comportamiento mecánico como: propiedades de la matriz rocosa; tipo y familia de discontinuidades, las cuales definen el grado de fracturación, la dimensión y forma de los bloques del macizo, sus propiedades hidrogeológicas; grado de alteración o meteorización; estado de tensiones in situ y presencia de agua.

Las clasificaciones definen los grados de calidad del macizo de acuerdo a las propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades, proporcionando valores estimativos de sus propiedades resistentes globales, no siendo 100% certeras sobre todos los parámetros geotécnicos y a sus esfuerzos.

El índice que define la clasificación es el denominado RMR (Rock Mass Rating) que evalúa la calidad del macizo rocoso a partir de los parámetros siguientes (Ramírez y Alejano, 2004, p.149):

- **Resistencia a compresión simple del material rocoso. Bieniawski, 1973.**
  - **RQD:** Índice rock quality designation, es el porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (en su eje) sin tener en cuenta las roturas frescas del proceso de perforación respecto de la longitud total del sondeo.
  - **Espaciado de las juntas**

- **Naturaleza de las juntas:** La descripción del estado de las juntas se realiza mediante los siguientes parámetros: apertura de las discontinuidades; continuidad de la junta según rumbo y buzamiento; rugosidad de los labios; resistencia de la roca en los labios de la discontinuidad y relleno de la junta.

- **Presencia de agua.**

- **Orientación de las discontinuidades.**

**Tabla 1.9: Grado de resistencia de la roca**

Grado	Término	Identificación en campo	Ejemplos	Schmidt	Is (Mpa)	UCS (Mpa)
R0	Extremadamente débil	Puede ser marcada por la uña	Panizo de las fallas	*	**	0.25-1
R1	Muy débil	Se desmenuza con golpes firmes, con la punta del martillo de geólogo y puede ser arañada por una navaja	Roca alterada e intemperizada	*	**	1 - 5
R2	Débil	Puede ser raspada con dificultad por una navaja, golpeando firmemente con la punta del martillo de geólogo se logra una marca poca profunda	Tiza, rocas salinas y potasio	< 20	**	5 - 25
R3	Medianamente fuerte	No puede ser raspada por una navaja, pero puede ser fracturada con un golpe firme del martillo de geólogo	Carbón, concreto, esquistos, arcillas, pizarras	20 - 30	1 - 2	25-50
R4	Fuerte	Se requiere mas de un golpe del martillo de geólogo para ser fracturada	Caliza, mármol, arenisca, esquistos	30 - 45	2 - 4	50 -100
R5	Muy fuerte	Se requiere muchos golpes con el martillo de geólogo para ser fracturada	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneis, granodiorita, peridotitas, riolita, tufo	45 - 60	4 - 10	100 -250
R6	Extremadamente fuerte	Puede ser apenas arañadas con el martillo de geólogo	Basalto fresco, chert, diabasa, gneis, granito, cuarcita	> 60	>10	>250

Fuente: Geotecnia

**Tabla 1.10: Discontinuidad**

Tipo de Estructura	Simbología	Valoración
Junta	j	1
Fallas	f	2
Estratos	e	3
Contacto	c	4

Fuente: Geotecnia

**Tabla 1.11: Espaciamiento**

Esp. (m)	Valorización
>2m	20
0.6 – 2 m	15
0.2 – 0.6 m	10
0.06 – 0.2 m	8
< 0.06 m	5

Fuente: Geotecnia

**Tabla 1.12: Persistencia**

Persistencia (m)	Valorización
< 1	6
1 – 3	4
3 – 10	2
10 – 20	1
> 20	0

Fuente: Geotecnia

**Tabla 1.13: Agua**

Presencia de Agua	simbología	Valoración
Completamente seco	c	15
Húmedo	h	10
Mojado	m	7
Empapado	e	4
Fluido	f	0

Fuente: Geotecnia

**Tabla 1.14: Relleno**

Relleno	Simbología	Tipo	Valoración
Carbonatos	ca	Suave	2
Yeso	y	Suave	2
Arena	s	Suave	2
Arcilla	cl	Suave	2
Silicatos	si	Duro	1
Cuarzo	q	Duro	1
Sulfuros	sf	Duro	1
Roca triturada	g	Duro	1
Pátinas de Oxido	ox	Ninguno	0
Limpia	c	Ninguno	0

Fuente: Geotecnia

**Tabla 1.15: Rugosidad**

Rugosidad	Valorización
1 y 4	6
2 y 5	5
3 y 7	3
6 y 8	1
9	0

Fuente: Geotecnia

### 1.3.2.5 Dimensiones e indicadores: Comportamiento de taludes

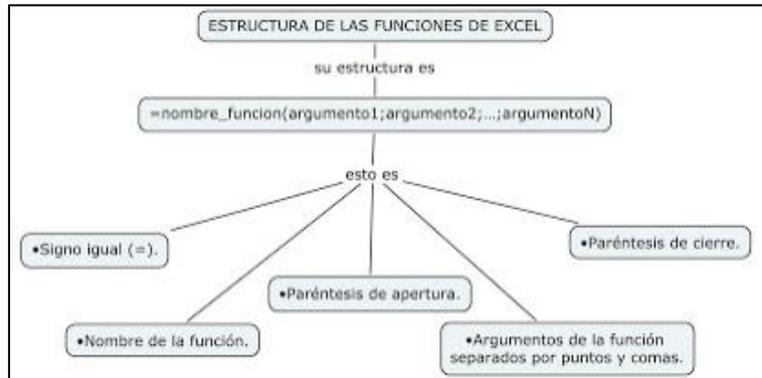
En esta investigación la variable dependiente ha considerado como dimensiones e indicadores los factores desencadenantes que influyen la estabilidad de los taludes (González de Vallejo et al., 2002, p.432), los cuales serán monitoreados por el sistema de monitoreo geotécnico integral y son:

- **Dimensión 1:** Factores geológicos, geométricos y geotécnicos,  
Indicadores: Desplazamientos, Velocidades y Aceleraciones.
- **Dimensión 2:** Factores hidrogeológicos.  
Indicadores: Niveles freáticos, presión de poros y direcciones de flujo.
- **Dimensión 3:** Factores climáticos.  
Indicadores: Humedad, temperatura y precipitaciones.

### 1.3.3 Software de procesamiento de datos

Para el procesamiento y análisis de los datos en esta investigación se emplearan las siguientes aplicaciones:

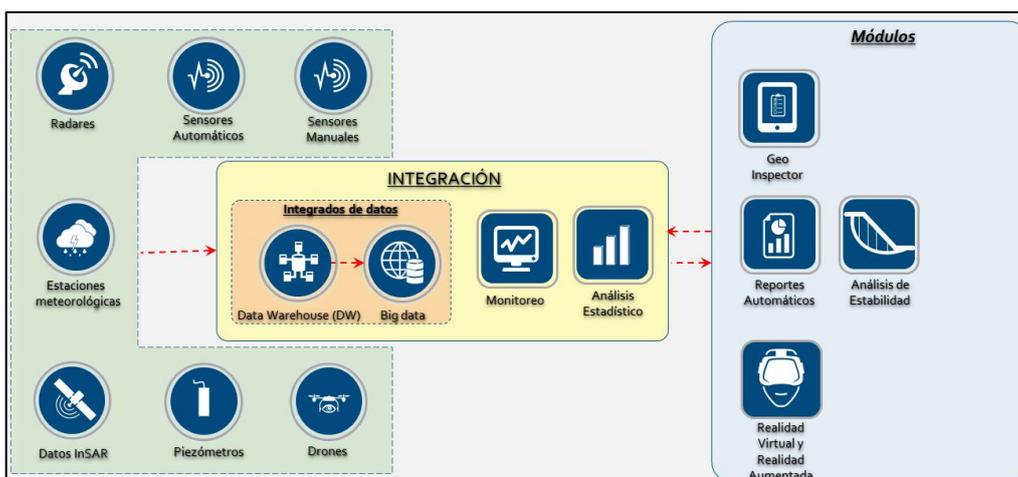
- **Microsoft EXCEL:** Esta hoja de cálculo, permitió procesar manualmente los datos de los prismas, piezómetros y estación de meteorología en la etapa pre prueba de esta investigación, generando gráficas y estadística descriptiva.



Fuente: Ayuda de Microsoft Excel

Figura 1.56: Mapa conceptual de las funciones de Excel

- **SHMS:** Es el sistema integrador de los sensores de monitoreo y sus módulos estadísticos y de estabilidad, los cuales permitieron integrar los datos, procesarlos automáticamente y analizarlos resultados, se empleó en la etapa pos prueba de esta investigación.



Fuente: (IntellTech, 2017)

Figura 1.57: Diagrama de funcionalidad del sistema de monitoreo integral

#### 1.3.4 Marco conceptual

**Ángulo de Fricción.** Es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual se define por el ángulo de la línea ( $\tan \phi$ ) (Duncan, 2005).

**Cohesión.** Es la representación de la resistencia al cortante, producida por la unión o cementación entre partículas (Suarez, 2009, p.77).

**Deslizamientos.** Es el movimiento que ocurre cuando el esfuerzo de corte excede (shear stress) el esfuerzo de resistencia (shear strength) del material (Cruden, 1991).

**GSI.** Índice de resistencia geológica, presentado por (Hoek E., 2002), como complemento a su criterio generalizado de falla en roca y para estimar los parámetros  $s$  y  $m$  de su criterio de rotura.

**Isotropía.** Es una medida de las propiedades direccionales de un material (Canoba, 2004, p.5).

**Macizo rocoso.** Es el conjunto de rocas intactas (matriz rocosa) y todas las discontinuidades que se presentan en el macizo (Suárez-Burgoa, 2014, p.1).

**Monitoreo.** Es un procedimiento sistemático que consiste en la toma continua o periódica; de los parámetros más representativos que permiten conocer el comportamiento de una estructura (Mendoza, 2011, p.6).

**Programa de monitoreo.** Son los registros de observaciones o movimientos que permitirán trabajar en las remedaciones de algo. (Duncan, 2005).

**Riesgo.** Es la cantidad esperada de vidas perdidas, personas heridas, daño a la propiedad, pérdidas económicas y ambientales, relacionadas a un fenómeno (Varnes, 1984).

**Series cronológicas.** Una serie de tiempo cronológica o temporal, trata una cantidad variable dependiente "Y" como función del tiempo "t", siendo la función  $Y=F(t)$  (Moya, 2002, p.411).

## **1.4 Formulación al problema**

### **1.4.1 Problema general**

¿De qué manera la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral permite evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017?

### **1.4.2 Problemas específicos**

¿En qué medida los procedimientos para establecer la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral permite evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017?

¿De qué forma se determinan las características de los sensores de un sistema de monitoreo geotécnico integral que permita evaluar el comportamiento de la estabilidad de taludes en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco en el año 2017?

¿De qué manera se generan los mapas de riesgos con un sistema de monitoreo geotécnico integral que permita evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017?

## 1.5 Justificación del estudio

Es la contribución o aporte que esta investigación, generara a la comunidad científica o para la sociedad. De acuerdo a (Hernández, Fernández y Baptista, 2014), una investigación se justifica por haber cumplido la mayor cantidad de criterios.

**Teórica:** La justificación teórica de esta investigación lleno los vacíos para la implementación de los sistemas de monitoreo geotécnicos integrales, poniendo en práctica los conocimientos teóricos de la instrumentación en los taludes presentados por González, Ferrer, Ortuño y Oteo (2003), Suarez (2009) y el análisis, diseño y estabilización de taludes rocosos propuesto por González, Ferrer, Ortuño y Oteo (2003), Morales (2000), asimismo se presentó la experiencia del autor en la implementación de sensores de monitoreo geotécnico en las principales minas de tajo abierto del país.

**Práctica:** Los métodos empleados para el diseño de los taludes basaron sus estudios en el factores de seguridad calculado, el cual no evalúa con certeza todo el macizo rocoso y las fuerzas que se ejercen en el talud, por lo que la implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral en un servidor WEB externo demostró a los geotecnistas de la mina información para determinar probabilísticamente el comportamiento de los taludes, detectando a tiempo inestabilidades y potenciales deslizamientos.

**Metodológica:** Este estudio mostro las nuevas herramientas de estadística descriptiva y probabilidades que determinan un mejor análisis de los datos geotécnicos, sirviendo de referencia a los especialistas mineros, geotecnistas, profesionales e investigadores que buscan reducir los riesgos de la estabilidad de taludes en los tajos abiertos, mejorando de esta manera la seguridad.

**Económica:** Un sistema de monitoreo permitió incrementar la explotación y producción de minerales ya que permite tener un control más eficiente y oportuno del comportamiento de los taludes.

**Seguridad:** Un sistema de monitoreo permitió implementar un programa de contingencias, con la finalidad de tener el riesgo controlado en la mina, no afectando los equipos y protegiendo la vida del personal.

## **1.6 Hipótesis**

### **1.6.1 Hipótesis general**

La implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.

### **1.6.2 Hipótesis específicas**

Los procedimientos implementados para un sistema de monitoreo geotécnico integral permiten evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.

Las características determinadas de los sensores de un sistema de monitoreo geotécnico integral permiten evaluar el comportamiento de la estabilidad de taludes en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco en el año 2017.

Los mapas de riesgos generados con un sistema de monitoreo geotécnico integral permiten evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco en el año 2017.

**Nota:** Las hipótesis presentadas son pseudo-hipótesis, porque no serán contrastadas según el tipo de investigación.

## **1.7 Objetivo**

### **1.7.1 Objetivo general**

Implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de los taludes, en el del tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.

### **1.7.2 Objetivos específicos**

Establecer los procedimientos de implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.

Determinar las características de los sensores de un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de la estabilidad de taludes en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco en el año 2017.

Generar mapas de riesgos con un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.

## II. MÉTODO

## II. Método

### 2.1 Diseño de investigación

El plan o estrategia es el “diseño” para obtener los datos que se desean. En el proceso cuantitativo, el investigador emplea su diseño para analizar la veracidad de las hipótesis generadas en un contexto específico o para obtener certeza de los lineamientos de la investigación (en el caso de no tener hipótesis). Los tipos propuestos clasifican a los diseños en experimentales y no experimentales. Los estudios experimentales se clasifican en experimentos puros, cuasi experimentos y pre experimentos. Los experimentos radican en aplicar un estímulo a un individuo, grupo, fenómeno o caso, y observar el efecto de este estímulo en alguna o algunas variables. La variable independiente es la causa y la dependiente el efecto (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.165). Esta investigación de acuerdo a su diseño es **experimental**.

#### 2.1.1 Método de investigación

En enfoques cuantitativos, se determina de lo general a lo particular (de las leyes y teoría a los datos), aplicándose la lógica deductiva (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.11). Bajo esta consideración el método a aplicar es **deductivo**.

#### 2.1.2 Tipo de investigación

Se caracteriza por el interés en la aplicación de los entendimientos teóricos a determinada situación concreta y los efectos prácticos que se deriven, por lo que es importante conocer para aplicar (Sánchez y Reyes, 2006, p.37). Según esta definición el tipo de investigación por su naturaleza es **aplicada**.

#### 2.1.3 Nivel de investigación

El interés de la investigación se concentra en explicar por qué sucede un fenómeno y en qué circunstancia se da éste, o por qué se relaciona entre dos o muchas variables. Investigan las causas por las que provienen ciertos fenómenos físicos o sociales (Borja, 2012, p.14). Conforme a este concepto la investigación es del nivel **explicativo**.

#### 2.1.4 Diseño de la investigación

Son cuasi – experimentos, los experimentos en los cuales los grupos de estudio no han sido escogidos al azar ya que estaban formados de esa manera antes de la investigación (Borja, 2012, p.29).

Un diseño cuasi experimental de series cronológicas de un solo grupo, no requiere grupo de control y consiste en una serie de mediciones periódicas que se realizan en el fenómeno en estudio, antes y después que se ha colocado la variable experimental. Asimismo cuando el investigador analiza efectos en el mediano o largo plazo, porque tiene bases para suponer que la influencia de la variable independiente sobre la dependiente tarda en manifestarse, a estos diseños se les conoce como series cronológicas (Centro de Investigación UCV, 2013, p.60). Bajo esta consideración la investigación tiene un diseño **cuasi experimental de series del tiempo o series cronológicas de un solo grupo** y su nomenclatura es:

**G** 01 02 03 **X** 04 05 06

Siendo: **G**: Muestra o grupo

**X**: Sistema de monitoreo geotécnico integral o estímulo

**01, 02**: Observaciones

Esta investigación contó con datos obtenidos, mediante sensores geotécnicos manuales y automáticos, que monitorean los taludes del tajo abierto de la mina, los cuales se consideraron como datos pre prueba, posteriormente se tomaron los datos y se procesaron con el sistema de monitoreo geotécnico integral y se realizaron mediciones a los taludes obteniéndose de esta manera los datos pos prueba, con los cuales el autor realizó la correlación y evaluación determinando que el monitoreo integral es más eficiente que el monitoreo por sensores individuales, en la mina.

## **2.2 Variables, operacionalización**

### **2.2.1 Variables**

#### **Variable 1: Sistema de monitoreo geotécnico integral**

Un sistema de monitoreo integral, es un grupo de módulos que se vinculan para permitir la centralización e integración de los instrumentos de monitoreo, proporcionando mediciones sistemáticas repetitivas de una posición o sector, considerándose un monitoreo casi en tiempo real si las medidas son más continuas, permitiendo la generación de alertas tempranas para minimizar los riesgos y deslizamientos potenciales que originan pérdidas materiales y humanas (SafeLand, 2012).

#### **Variable 2: Comportamiento de taludes**

El comportamiento de taludes en macizos rocosos, son actividades complicadas que suceden en el talud en base a los factores que gobiernan su estabilidad (González de Vallejo et al., 2002).

## 2.2.2 Operacionalización de las variables

Implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de taludes en la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento / Ítems	Escala
<b>V1: SISTEMA DE MONITOREO GEOTÉCNICO INTEGRAL</b>	Un sistema de monitoreo integral, es un grupo de módulos que se vinculan para permitir la centralización e integración de los instrumentos de monitoreo, proporcionando mediciones sistemáticas repetitivas de una posición o sector; considerándose un monitoreo casi en tiempo real, si las medidas son más continuas, permitiendo la generación de alertas tempranas para minimizar los riesgos y deslizamientos potenciales que originan pérdidas materiales y humanas (SafeLand, 2012).	La capacidad de medir datos en campo, procesarlos y generar reportes y alertas tempranas, basados en el uso de los sensores de monitoreo, el software integrador y el sistema de alertas, los cuales definen el estado funcional del Sistema de Monitoreo Geotécnico Integral, el cual permite la evaluación constante del comportamiento de los taludes.	Procedimientos para implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral	Estrategia de monitoreo	Ficha de registro de datos de las estrategias de monitoreo.	Razón
				Sistemas de comunicación	Ficha de registro de datos de los sistemas de comunicación.	
				Criterios de ubicación de los instrumentos y parámetros de medición.	Ficha de registro de los criterios de ubicación de instrumentos.	
			Características de los sensores de monitoreo	Técnicas de monitoreo.	Ficha de registro de datos de las técnicas de monitoreo.	
				Características de sensores	Ficha de registro de las características de los sensores.	
				Tipos de sensores	Ficha de registro de los tipos de sensores.	
			Generación de mapas de riesgos, alertas y reportes	Módulos del sistema	Ficha de registro de los módulos del sistema.	
				Umbral de alertas.	Ficha de registro de los umbrales	
				Mapas de riesgos, alertas y reportes.	Ficha de registro de los mapas de riesgos.	

**Implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de taludes en la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.**

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento / Ítems	Escala
<b>V2: COMPORTAMIENTO DE TALUDES</b>	El comportamiento de taludes en macizos rocosos, son actividades complicadas que suceden en el talud en base a los factores que gobiernan su estabilidad (González de Vallejo et al., 2002).	Con las fichas de registro de datos obtenidos en campo, se pueden determinar las variaciones de los indicadores como: desplazamientos, velocidades, nivel de agua, temperatura, entre otros, permitiendo determinar probabilidades del estado de los factores que influyen en el comportamiento de taludes.	Factores geológicos, geométricos y geotécnicos	Desplazamientos Velocidades Aceleraciones	Ficha de registro de datos para la medición con los sensores superficiales: Radares, Estaciones Totales, Extensómetros.  Ficha de registro de datos para el cálculo de desplazamientos, velocidades y aceleraciones.	Razón
			Factores hidrogeológicos	Nivel freático Presión de poros Direcciones de flujo	Ficha de registro de datos para la medición con los sensores hidrogeológicos: Piezómetros	
			Factores climáticos	Temperatura Precipitaciones. Humedad relativa del aire	Ficha de registro de datos para la medición con los sensores climatológicos: Estaciones meteorológicas	

## **2.3 Población y muestra**

### **2.3.1 Población**

La población objetivo, es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Esta queda limitada por el problema y por los objetivos de la investigación (Arias, 2012, p.81). Bajo esta consideración la población está definida por los taludes desarrollados en el tajo de la mina que alcanzan a **15 unidades o bancos.**

### **2.3.2 Muestra**

La muestra es un subconjunto finito o representativo, que se separa de la población accesible. En caso la población, por el número de unidades que la integran, resulta accesible en su totalidad, no será necesario extraer una muestra, en consecuencia, se podrá investigar u obtener datos de toda la población objetivo. (Arias, 2012, p.83). Por tratarse de una población menor el tamaño de la **muestra será igual al de la población: 15 unidades o bancos.**

### **2.3.3 Muestreo**

Es la técnica o procedimiento que se emplea para seleccionar la muestra. Hay dos formas de muestreo: probabilístico y no probabilístico (Arias, 2012, p. 83). En el caso de los muestreos no probabilístico existe el tipo intencional u opinático, por el cual los elementos son escogidos con base en criterios o juicios preestablecidos por el investigador (Arias, 2012, p.85). En la investigación se empleó el muestreo **no probabilístico del tipo intencional.**

## **2.4 Técnica e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad**

La recopilación de toda la información de campo se realizó mediante formatos los cuales se presentan en la investigación. Este proceso implica tres actividades estrechamente vinculadas entre sí: primero, seleccionar el instrumento de recolección de datos, el mismo que debe ser válido y confiable, segundo, aplicar el instrumento a la muestra de estudio; es decir observaciones, registros o mediciones de variables y tercero, analizar la información recopilada. (Borja, 2012, p.33).

### **2.4.1 Técnicas de recolección de datos**

La técnica es la observación, la cual consiste en observar u obtener mediante la vista, en forma sistemática, cualquier fenómeno, situación o hecho, que se genere en la naturaleza o en la sociedad, en función de los objetivos preestablecidos en la investigación (Arias, 2012, p.69). En esta investigación la técnica empleada es **la observación directa de los hechos**, mediante el empleo de instrumentos de medición.

### **2.4.2 Instrumentos de recolección de datos**

Son los formatos, recursos o dispositivos (en formato digital o papel), que se emplean para capturar, registrar o almacenar datos. (Arias, 2012, p.70). En este estudio el instrumento a emplear son las **Fichas de Recolección de Datos**.

**Tabla 2.1:** *Recolección de datos, mediante técnicas e instrumentos.*

TÉCNICA	INSTRUMENTOS
Observación en campo de la superficie de los macizos rocosos para determinar el: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desplazamientos</li> <li>• Velocidades</li> <li>• Aceleraciones</li> </ul>	Ficha de recolección de datos para la medición superficial del macizo rocoso con: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Radares</li> <li>• Estaciones Totales</li> <li>• Extensómetros</li> </ul>
Observación en campo de los parámetros hidrogeológicos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel freático del agua</li> <li>• Presión de poros</li> <li>• Direcciones de flujos</li> </ul>	Ficha de recolección de datos para la medición de los parámetros hidrogeológicos con: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Piezómetros</li> </ul>
Observación en campo de los parámetros climatológicos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura</li> <li>• Humedad</li> <li>• Precipitaciones.</li> </ul>	Ficha de recolección de datos para la medición de los parámetros climatológicos con: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estaciones meteorológicas</li> </ul>

### 2.4.3 Validez

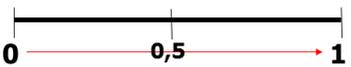
La validez, es el grado en que un instrumento mide realmente la variable que pretende medir. La validez es un concepto que tiene varias evidencias como: 1) evidencia relacionada con el contenido, 2) Evidencia relacionada con el criterio y 3) Evidencia relacionada con el constructor; pero también otro tipo de validez que otros autores consideran es la face validity o validez de expertos, la cual se refiere al grado que un instrumento mide a la variable en cuestión, de acuerdo con “voces calificadas”, se determina mediante la evaluación del instrumento ante expertos (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.204). De acuerdo a lo indicado, para esta investigación la validación de los instrumentos de medición se realizará mediante la **validación de expertos o face validity**.

Para esta investigación, la validez de los instrumentos de medición la realizaron tres ingenieros civiles colegiados, siendo estos los siguientes:

- Jhonatan Saúl Bernal Fernández, ingeniero civil, CIP N° 172868
- José M. Bruno Amaya, ingeniero civil, con CIP N° 111163
- Janett F. Arteaga Herrera, ingeniero civil, con CIP N° 111327

Los cuales realizaron la calificación mediante la tabla de (Oseda, 2011). El rango de calificación va de 0 a 1, debiendo ser la validez superior a 0,80, para este caso los instrumentos obtuvieron una validez de 0.98 por lo que de acuerdo a Oseda se considera como Excelente Validez. Ver en anexos el cuadro de la validación de instrumentos, empleados en esta investigación.

**Tabla 2.2:** *Rango de validación de expertos.*



Rango	Validez
0,53 a menos	Validez nula
0,54 a 0,59	Validez baja
0,60 a 0,65	Válida
0,66 a 0,71	Muy válida
0,72 a 0,99	Excelente validez
1	Validez Perfecta

Fuente: (Oseda, 2011).

Las fichas de recolección de datos planteadas en la investigación midieron los datos objetivos de las dos variables planteadas en este estudio con la finalidad de lograr alcanzar los objetivos específicos y por ende el objetivo general.

#### 2.4.4 Confiabilidad

Es el grado en que el empleo repetitivo de un instrumento de medición, que se da a los mismos individuos u objetos, da resultados iguales. La confiabilidad cuantitativa se determina al calcular el coeficiente de fiabilidad, variando estos entre 0 y 1, donde 0 es confiabilidad nula y 1 es confiabilidad absoluta. Cuando más se acerque a cero, mayor error habrá en la medición. Los métodos más conocidos para calcular la confiabilidad son: a) medida de estabilidad, b) formas alternadas, c) mitades partidas y d) consistencia interna. También se aplica la medida de congruencia interna denominada “coeficiente alfa Cronbach”, que es el más utilizado (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.208).

El coeficiente alfa de Cronbach varía entre 0 y 1, siendo: 0 confiabilidad nula y 1 confiabilidad total. El coeficiente de Cronbach se calcula mediante la varianza de los ítems y la varianza del puntaje total (Terán et al., 2008).

$$\alpha = \left[ \frac{K}{K-1} \right] \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^K S_i^2}{S_t^2} \right]$$

Siendo:

$$\sum_{i=1}^K S_i^2$$

: La suma de varianzas de cada ítem.

$$S_t^2$$

: La varianza del total de filas (puntaje total de los jueces)

$$K$$

: El número de preguntas o ítems.

Importante a considerar:

Este estudio empleó como instrumentos de medición las fichas de recolección de datos y no cuestionario; por lo que **no se requirió determinar** la confiabilidad de los instrumentos (Centro de Investigación UCV, 2013).

## **2.5 Métodos de análisis de datos**

Esta investigación es cuantitativa y los datos se han presentado de forma numérica y en dos niveles de complejidad:

### **Análisis descriptivos**

Para el análisis de los datos obtenidos en la etapa pre prueba se ha empleado los programas propios de algunos de los sensores de monitoreo y para otros equipos se ha procesado manualmente los datos con el programa Microsoft Excel. Después de la implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral, se ha empleado el módulo de análisis estadístico del sistema SHMS, con el cual se calcularon la media, moda, mediana, desviación estándar y varianza, además se presentaron datos en tablas de frecuencias e histogramas, así como gráficos de series temporales de desplazamientos y velocidades.

### **Análisis ligados a las hipótesis**

Esta investigación no ha requerido probar la hipótesis, sino se realizó el cumplimiento de objetivos específicos y general, por tratarse de un estudio con variables cuantitativas.

## **2.6 Aspectos éticos**

El presente trabajo de investigación se encuentra dentro de las referencias bibliográficas presentadas, tal como se muestra en el reporte del programa Turnitin al cual fue sometida esta investigación, confirmando que cuenta con la autenticidad respectiva. Asimismo ha respetado la propiedad intelectual, respeto a las convicciones políticas, religiosas y morales, también al medio ambiente y la biodiversidad, la responsabilidad social, jurídica y ética, el respeto a la privacidad y la honestidad intelectual.

### **III. RESULTADOS**

### III. Resultados

#### 3.1 Descripción de la zona estudio

##### Ubicación:

El lugar en estudio se ubica en el Cuadrángulo 30-t Yauri, ubicado al Noreste del Altiplano Peruano, Provincia de Espinar, Región del Cusco, al sur de Perú, en las cuencas de los ríos Cañipia y Tintaya, ambos tributarios del Río Salado por su margen izquierda, siendo afluente del Río Apurímac. El yacimiento minero comprende 13 concesiones mineras que cubren un área total de 3 225 ha. Antapaccay se encuentra aproximadamente a 15 km de Yauri, 256 km desde la ciudad del Cusco y a 255 km desde la ciudad de Arequipa. La elevación del sitio de la mina es aproximadamente 4 000 msnm. El acceso a la mina se realiza por la Carretera PE-34E. Tiene una fisiografía natural suave, tiene clima frío y seco.

##### Datos de los sensores de monitoreo:

En la mina, la instrumentación geotécnica y sus datos se procesan diariamente, entregándose informes diarios, semanales y mensuales, la generación de estos últimos puede llevar varias horas o días por lo que hay muchas veces retraso en la toma de decisiones y la apertura de nuevos frentes.



Fuente: Propia

**Figura 3.1:** Sectores del tajo

Los datos de monitoreo no se encuentran integrados, por lo que no se puede realizar la correlación del comportamiento de los instrumentos; es por ello que mediante su contrato anual del plan de soporte y mantenimiento de los sensores de monitoreo entre la mina y Química Suiza Industrial del Perú S.A., así como la

iniciativa del investigador solicitaron los datos de los sensores de monitoreo a los usuarios de geotecnia de la mina, con la finalidad de demostrarles las ventajas de implementar el sistema de monitoreo geotécnico integral en un servidor WEB externo, es así que accedieron a brindarla; por lo que en la etapa pos prueba de esta investigación se integraron los datos en una sola base de datos centralizada, permitiendo realizar mediante los módulos estadísticos y de estabilidad del sistema integrador el procesamiento y análisis de la información, generando así mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes automáticos.

Cabe señalar en la etapa pre prueba de la investigación también se procesaron datos, algunos de ellos con los propios programas de los instrumentos y otros manualmente con la hoja de cálculo Microsoft Excel.

### 3.2 Recopilación de información y análisis de datos: Pre Prueba

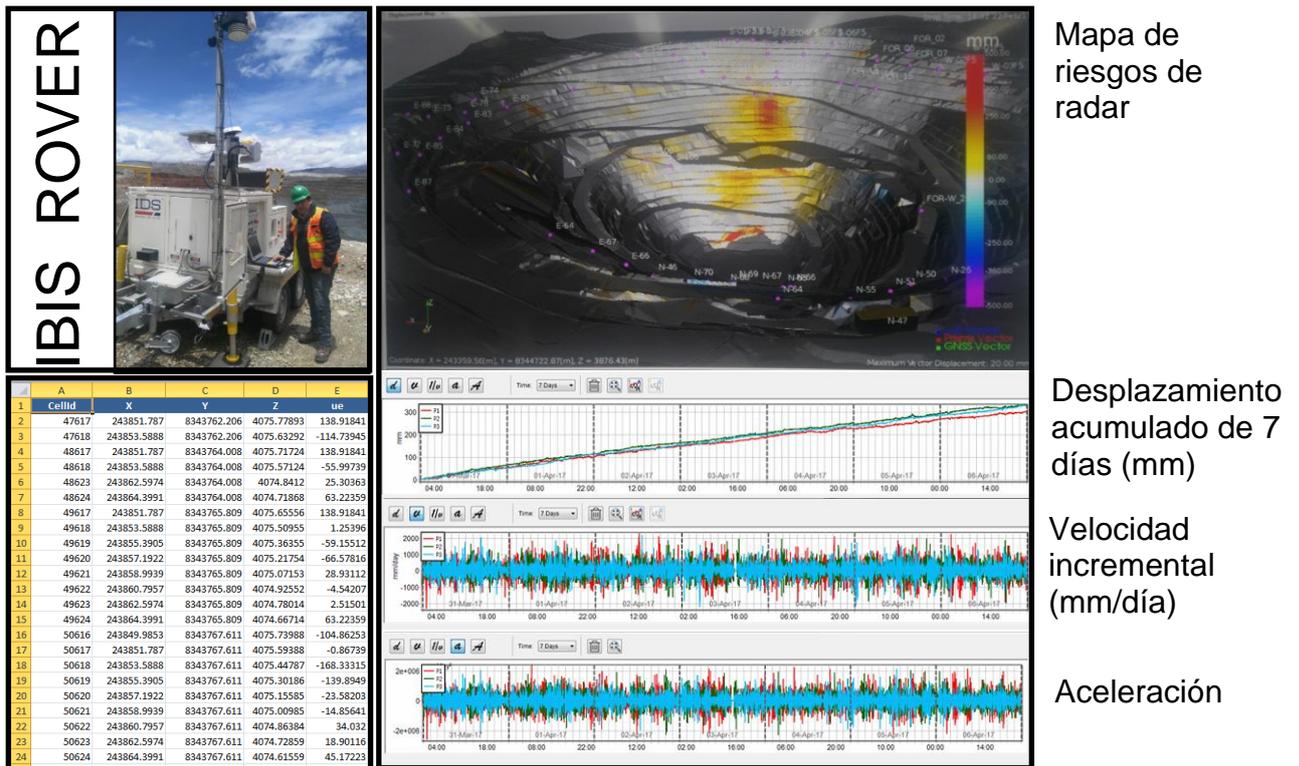
#### Antes de implementar el sistema de monitoreo geotécnico

El diseño de esta investigación es **cuasi experimental de series cronológicas de un solo grupo**, por lo que se proporcionan los datos de monitoreo en 02 etapas: pre prueba y pos prueba, para lo cual se emplean las fichas de registro de datos de la variable 02 las cuales serán llenadas con los datos de los sensores geotécnicos manuales y automáticos de la mina.

En la etapa pre prueba se trabajaron con datos de los sensores de monitoreo, siendo en su gran mayoría sensores manuales, así como el procesamiento de sus datos. El radar IBIS Rover, captura, procesa y genera sus alertas y mapas de riesgo automáticamente.

#### 3.2.1 Análisis y resultados de los datos pre prueba del radar IBIS Rover

Sensor: Radar de Apertura Sintética IBIS Rover. Italia. 2015



Fuente: Elaboración propia.

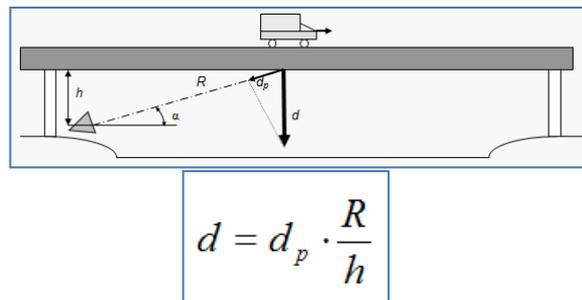
Figura 3.2: Radar IBIS Rover

El radar interferométrico IBIS Rover de apertura sintética es un sistema móvil que permite monitorear en tiempo real varios sectores de la mina por tener un campo visual de 270°, alcanza a monitorear hasta 2 500 m., con una frecuencia de lectura de 3 minutos por barrido, mide la sensibilidad del terreno o la diferencia de distancia entre objetos o pixel con precisión hasta 0.1 mm y realiza las correcciones atmosféricas de manera automática.

Los datos de monitoreo son pixeles de radar, los cuales se almacenan en su base de datos propia y mediante el programa IBIS Guardian se ha detecto la zona inestable graficándose los desplazamientos acumulados, velocidades incrementales, aceleraciones, mapas de riesgos radar y reportes de monitoreo.

### Datos, Cálculos y Resultados:

CellId	X	Y	Z	Value
98520;	243878.91771;	8343801.75304;	4067.24199;	-11.51414
98521;	243880.98671;	8343801.75304;	4067.17189;	-11.51414
99337;	243502.35971;	8343803.82204;	4081.93374;	24.84051
99338;	243504.42871;	8343803.82204;	4081.91969;	24.93674
99339;	243506.49771;	8343803.82204;	4081.90565;	22.68377
99340;	243508.56671;	8343803.82204;	4081.94392;	22.80396
99341;	243510.63571;	8343803.82204;	4081.98198;	22.92149
99342;	243512.70471;	8343803.82204;	4082.01906;	23.02719
99343;	243514.77371;	8343803.82204;	4082.05214;	23.11993
99344;	243516.84271;	8343803.82204;	4082.08522;	23.19996
99345;	243518.91171;	8343803.82204;	4082.11830;	8.77138
		⋮		
99348;	243525.11871;	8343803.82204;	4081.98791;	-24.94239



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.3:** Datos registrados por el radar IBIS Rover

La gráfica de desplazamiento acumulado muestra un movimiento en 06 días con tendencia a seguir aumentando, motivo por el cual se muestra en el mapa de riesgos de la imagen radar un sector de color rojo activándose alerta roja según los umbrales definidos por el área de geotecnia de la mina. No se presentan herramientas de tendencias ni muestran datos de estadística, que apoyen el análisis e interpretación de la información.

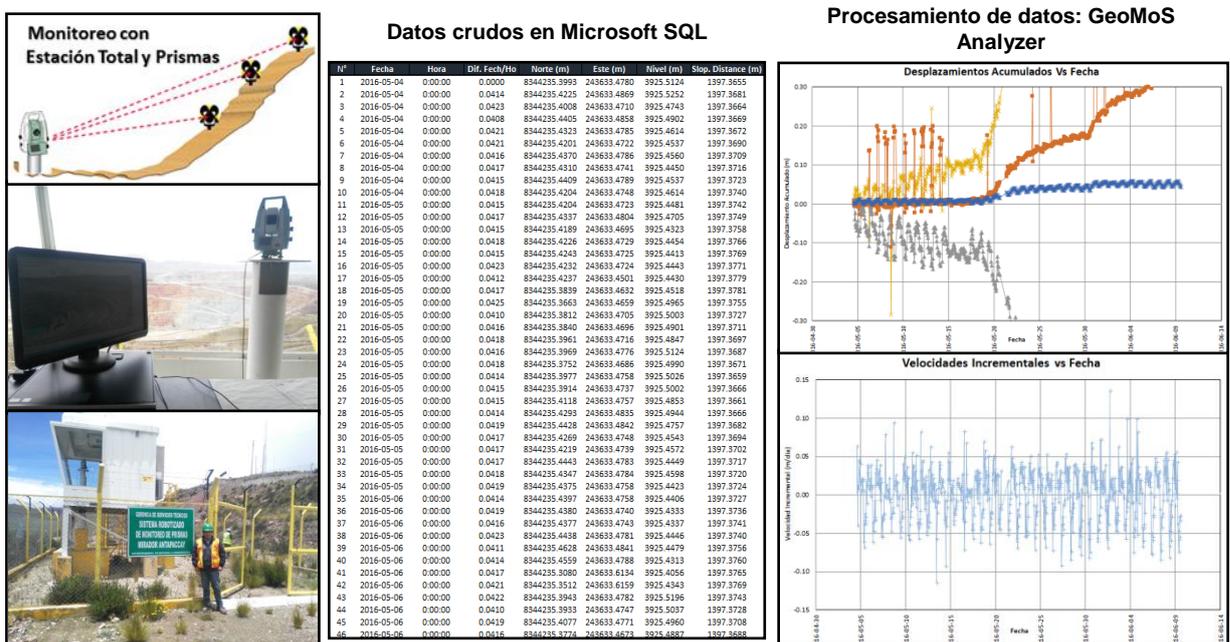
### 3.2.2 Análisis y resultados pre prueba de las Estaciones Totales

En la mina se realiza el monitoreo topográfico de manera continua y automática empleando la aplicación GeoMoS Monitor, estaciones totales robotizadas, prismas de monitoreo GPR112 y el procesamiento de datos se realiza con la aplicación GeoMoS Analyzer de la marca Leica.

El sistema topográfico, empleando el reconocimiento automático de target ATR, permite medir prismas hasta 3000 m con precisión de 1" angular y de distancia de 1mm más 0,6 PPM.

Los datos capturados son almacenados en la base de datos Microsoft SQL, y procesados con GeoMoS Analyzer generando las gráficas de desplazamientos acumulados y las velocidades incrementales, así como los vectores resultantes de desplazamientos.

#### Datos, cálculos y resultados:



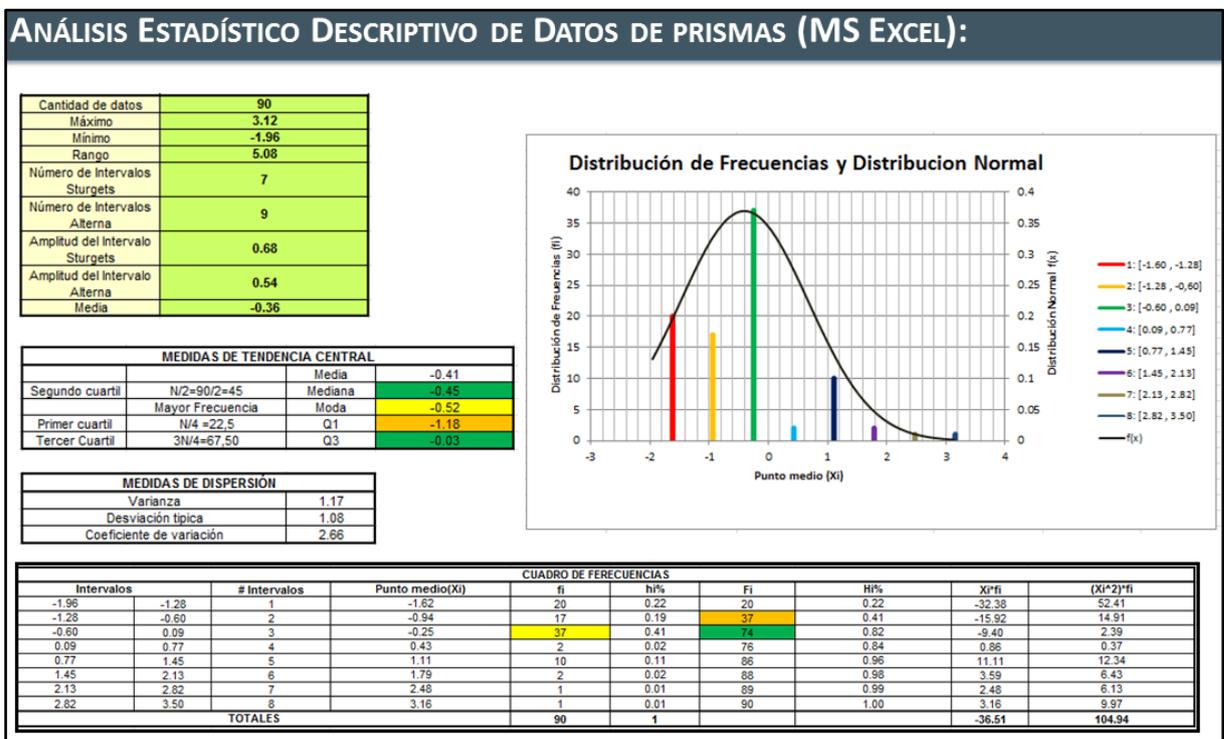
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4: Datos registrados por las estaciones totales robotizadas y GeoMoS

La gráfica de desplazamiento acumulado muestra un movimiento en 30 días con tendencia a seguir aumentando, motivo por el cual se debe configurar los umbrales para que muestre la alerta roja en los prismas.

Asimismo, se presentan efectos de saltos o ruidos en las gráficas, generados principalmente por los cambios atmosféricos durante el monitoreo, estos datos deben eliminarse, esta labor se realiza de manera manual, por lo que se debe asignar un personal para que realiza esta labor, también no presenta herramientas de tendencias.

Con la finalidad de tener un mejor análisis de los datos el investigador ha tenido que exportar los datos del GeoMoS Analyzer a Microsoft Excel para reprocesar los datos y obtener información estadística que apoye el análisis e interpretación de los movimientos que se presentan en los taludes del tajo abierto.



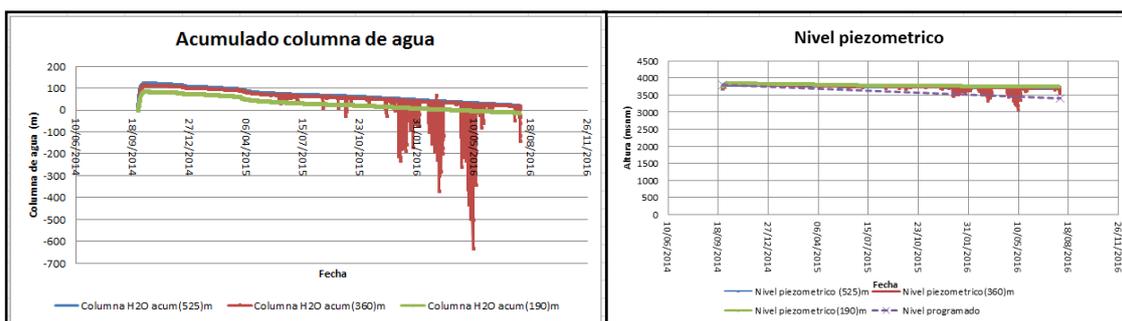
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3.5:** Información estadística de las mediciones con estaciones totales

### 3.2.3 Análisis y resultados pre prueba de piezómetros de cuerda vibrante

#### Datos, Cálculos y Resultados:

En la mina el monitoreo del agua es de vital importancia ya que el nivel freático se encuentra muy próximo a la superficie de los taludes del tajo, por ello se han colocado piezómetros de cuerda vibrante para medir el nivel piezométrico y la columna de agua acumulada. La captura de datos en campo y el procesamiento de datos son manuales y se realiza en Microsoft Excel.



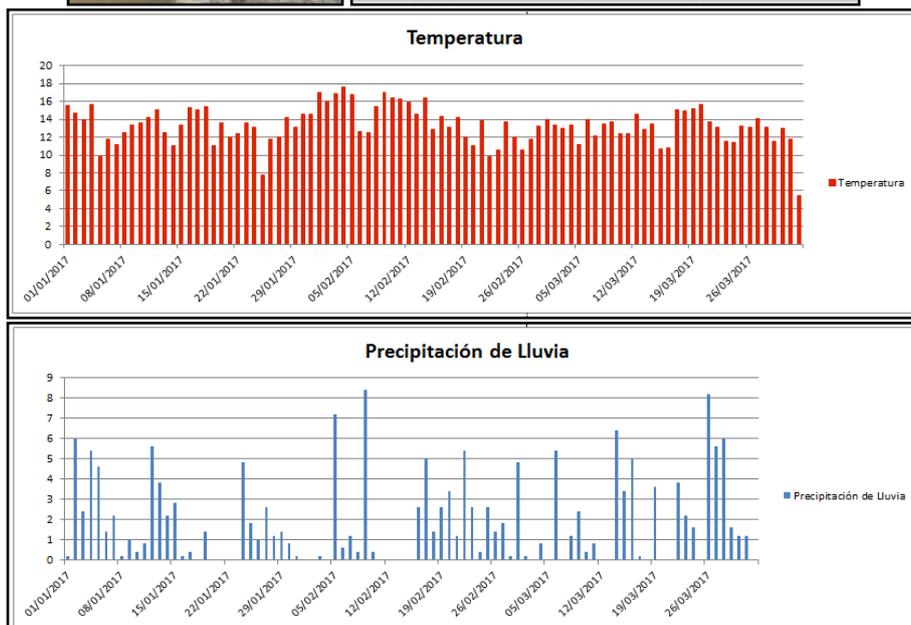
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.6: Datos registrados y procesados de los piezómetros

### 3.2.4 Análisis y resultados pre prueba de las estaciones meteorológicas

#### Datos, Cálculos y Resultados:

En la mina el monitoreo climatológico es de vital importancia ya que las precipitaciones en la época de verano varían entre 700 a 1000 mm por año, por ello se han colocado estaciones climatológicas para medir la temperatura, precipitaciones de lluvia y la humedad relativa. La captura de datos en campo y el procesamiento de datos son manuales y se realiza en Microsoft Excel.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.7: Datos y procesados de las estaciones meteorológicas

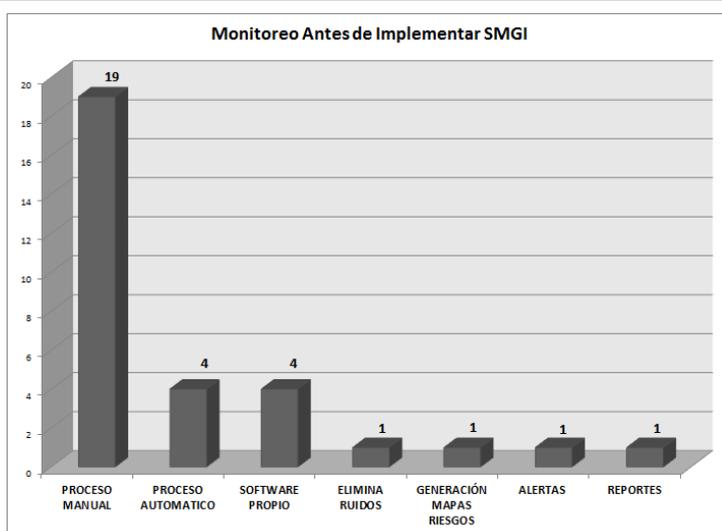
### 3.2.5 Resumen de los datos de monitoreo pre prueba

Los resultados presentados y obtenidos con los diversos sensores de monitoreo en la etapa pre prueba de la investigación no pueden ser correlacionados uno con otro ya que cada sensor tiene su propia manera de capturar, procesar y almacenar los datos de forma independiente, no pudiendo centralizar la data, para convertirla en información que permita tomar decisiones precisas y eficientes. Por otro lado el cálculo probabilístico del comportamiento de todo el macizo rocoso es complicado resolverlo ya que no existe vinculación entre todos los datos capturados lo que genera que no se pueda predecir a tiempo posibles inestabilidades y por ende deslizamientos en los taludes de la mina.

En la etapa pre prueba se han procesado los datos de los sensores de monitoreo manualmente, en un tiempo de tres días con dos usuarios debidamente capacitados, los datos se obtuvieron de son siguientes sensores:

**Tabla 3.1:** *Sensores utilizados en la etapa pre prueba de la investigación*

Monitoreo Manual de sensores de monitoreo antes de Implementar el Sistema Integral	
PROCESO MANUAL	19
PROCESO AUTOMATICO	4
SOFTWARE PROPIO	4
ELIMINA RUIDOS	1
GENERACIÓN MAPAS RIESGOS	1
ALERTAS	1
REPORTES	1
El monitoreo geotécnico antes de implementar el sistema integral, se realiza desde la captura hasta el procesamiento de datos en su gran mayoría de manera manual, por lo que se tiene que destinar mayor personal, tiempo y recursos para la determinación de las zonas de riesgo de acuerdo a la data recolectada.	



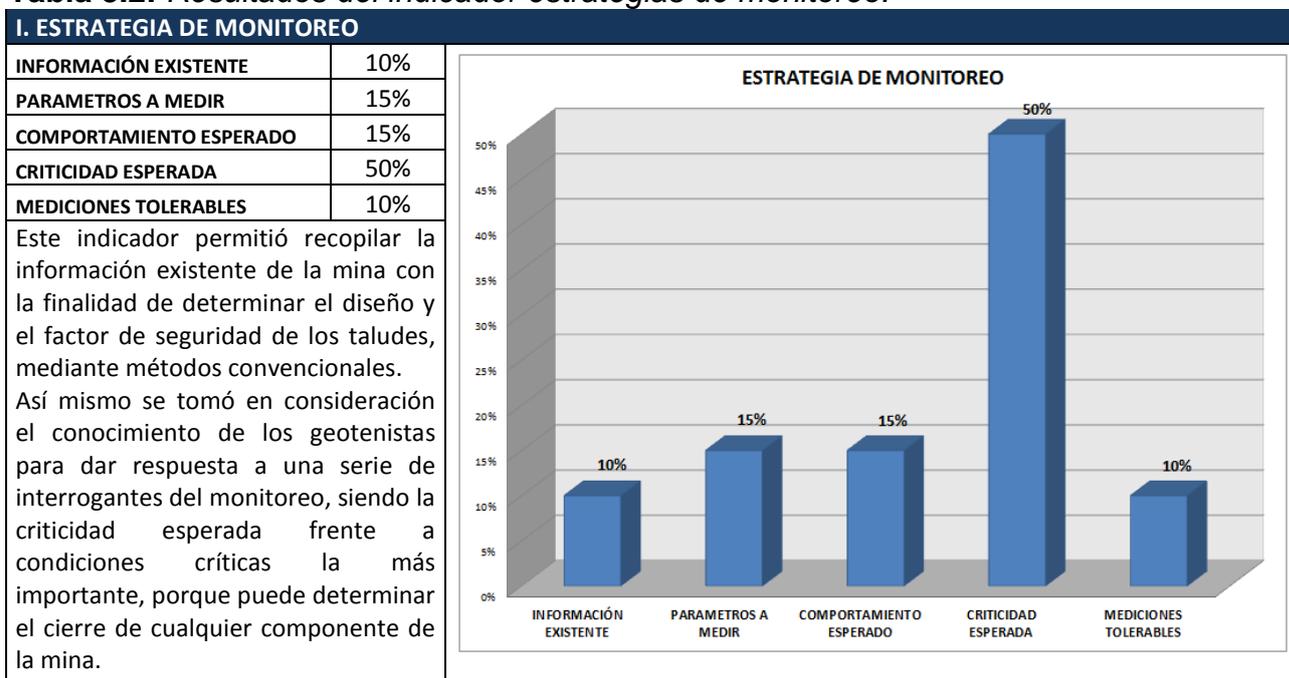
### 3.3 Procedimientos para implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral

El establecimiento de los procedimientos para la implementación de un sistema de monitoreo, debe ser planificado desde los objetivos hasta el uso de los datos, considerándose que debe permitir obtener el comportamiento probabilístico de los taludes mediante el monitoreo integral. Para este estudio las indicaciones de ingenieros geotecnistas, así como el personal especialista en tecnología de la información, brindaron información de los indicadores de la ficha de registro de datos de la variable 01 y dimensión 01 (ver anexo A fichas de registros de datos). Fue un grupo de especialistas en geotecnia que brindaron información, respecto a los criterios que se deben tomar en cuenta para establecer los procedimientos para la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral.

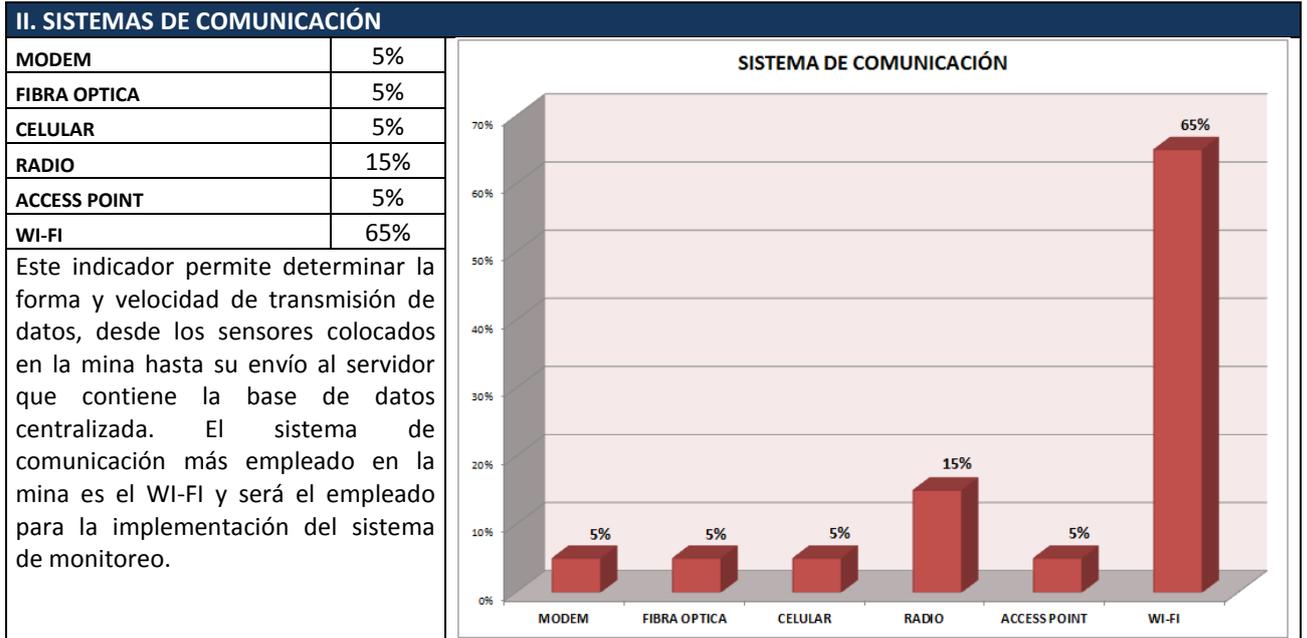
Los datos fueron procesados en la aplicación Microsoft Excel y permitió presentar el análisis y los resultados.

#### Análisis y resultados:

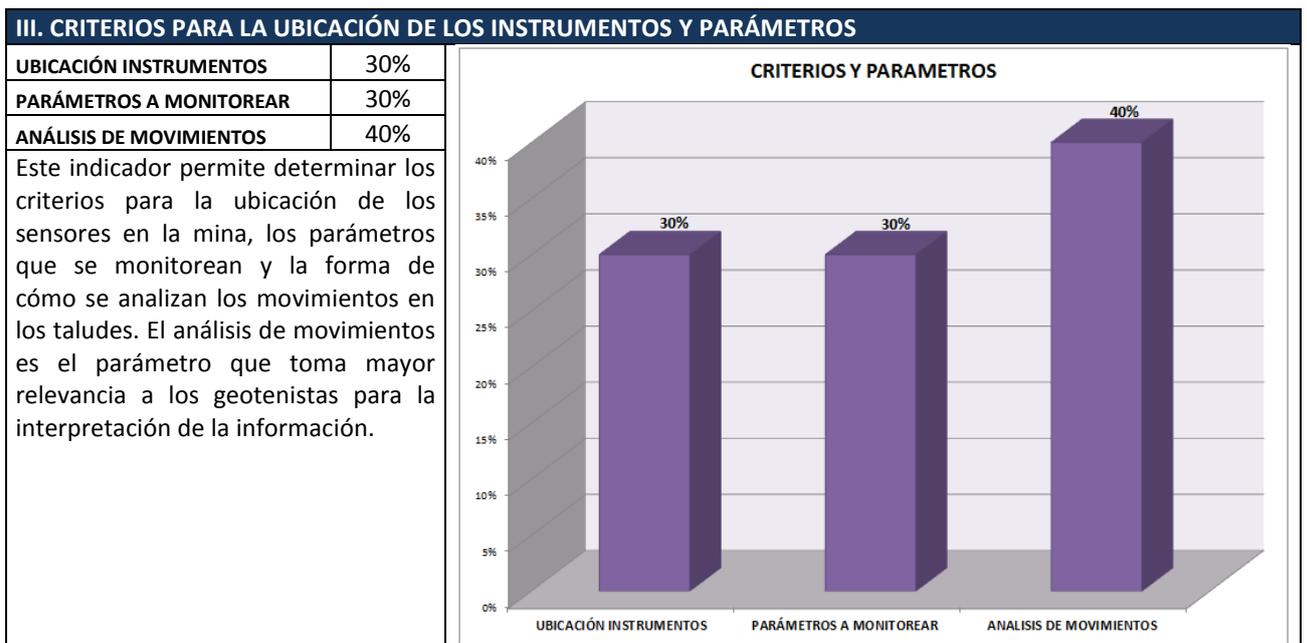
**Tabla 3.2:** Resultados del indicador estrategias de monitoreo.



**Tabla 3.3:** Resultados del indicador sistemas de comunicación.



**Tabla 3.4:** Resultados del indicador criterios para la ubicación de los instrumentos



De acuerdo al análisis y los resultados obtenidos, los especialistas en monitoreo geotécnico consideran que los tres indicadores más importantes que se deben cumplir para la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral: la criticidad esperada frente a un evento, el sistema de comunicación de los sensores y los parámetros de control para el análisis de los movimientos.

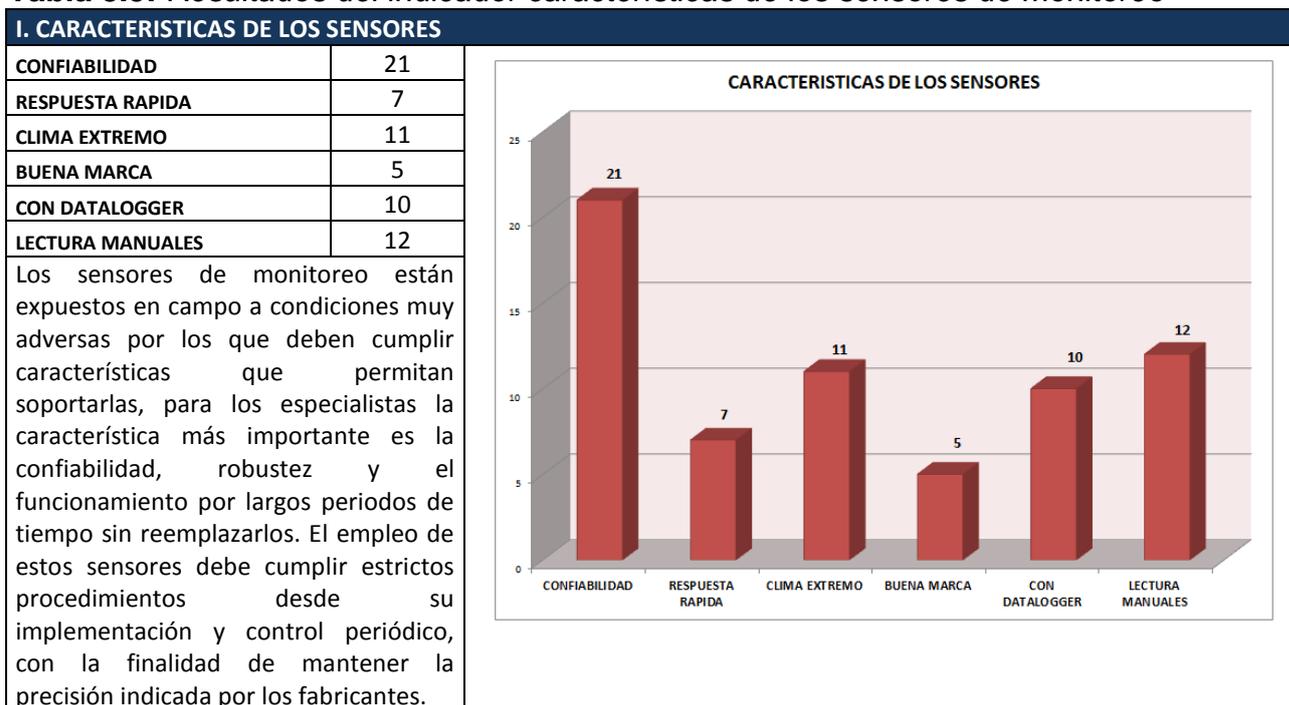
### 3.4 Características de los sensores de monitoreo para un sistema de monitoreo geotécnico integral

Los sensores de monitoreo que se emplean en la mina permiten medir los parámetros que determinan los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del comportamiento de los taludes, para esta investigación se han considerado las indicaciones de ingenieros geotecnistas y las especificaciones técnicas de los sensores de monitoreo que existen en el mercado, brindando información de los indicadores de la ficha de registro de datos de la variable 01 y dimensión 02 (ver anexo A fichas de registros de datos). Se han tomado en cuenta para este estudio los sensores de monitoreo, determinándose sus características.

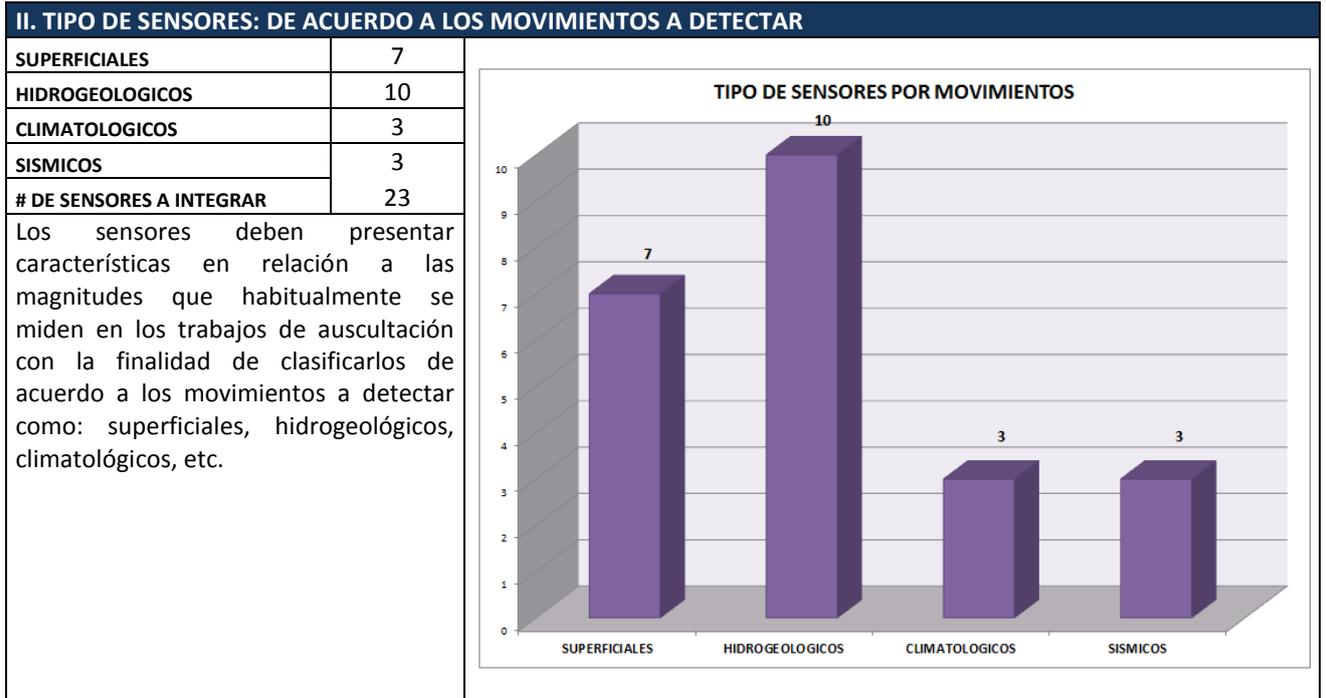
Los datos se procesaron en la aplicación Microsoft Excel y permite presentar el análisis y los resultados de las características de los sensores.

#### Análisis y resultados:

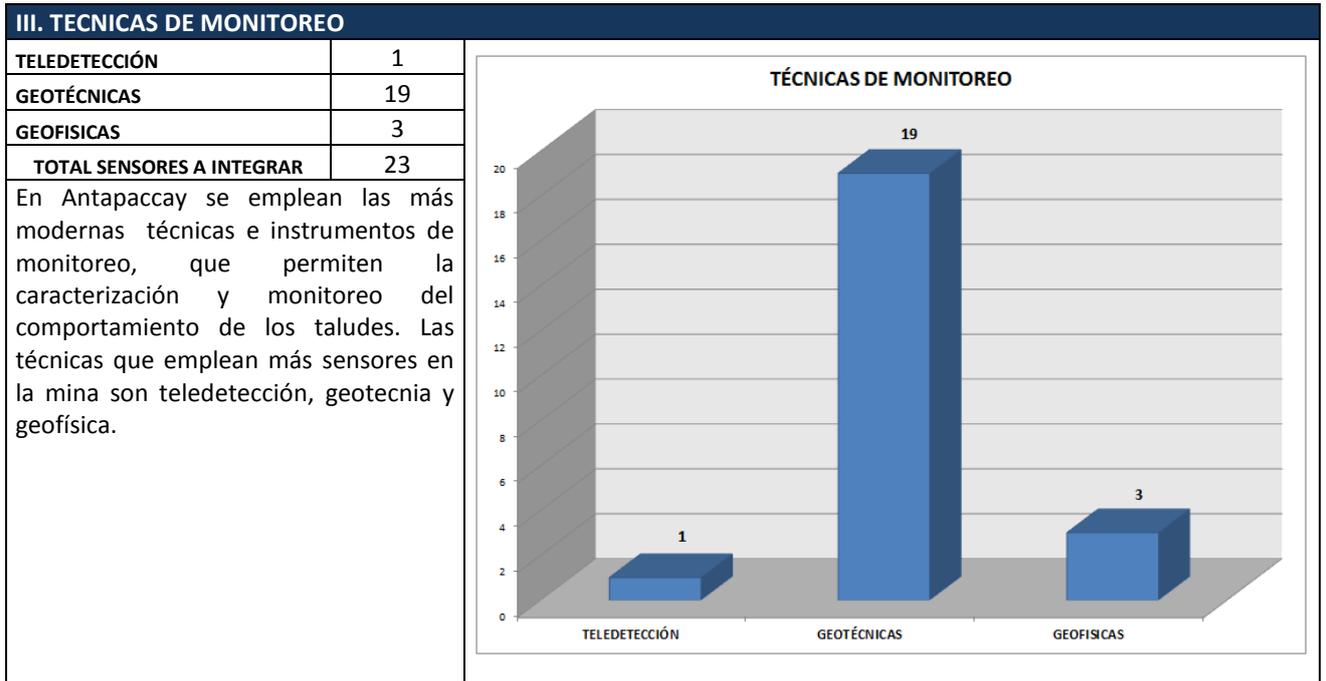
**Tabla 3.5:** Resultados del indicador características de los sensores de monitoreo



**Tabla 3.6: Resultados del indicador tipos de sensores de monitoreo**



**Tabla 3.7: Resultados del indicador técnicas de monitoreo**



De acuerdo a los resultados obtenidos y al análisis de los tres indicadores estudiados, se ha determinado que las características más importante que deben cumplir los sensores son la confiabilidad, robustez y funcionamiento por largos periodos de tiempo sin ser reemplazados; asimismo los sensores geotécnicos son los más empleados ya que miden los movimientos superficiales, además deben cumplir con la compatibilidad de integrar los datos al sistema de monitoreo geotécnico.

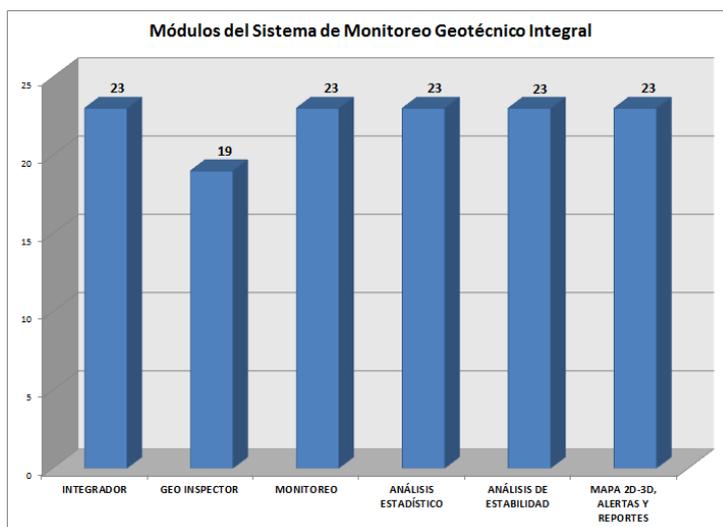
### 3.5 Generación de mapas de riesgos con un sistema de monitoreo geotécnico integral

La generación de los mapas de riesgos, mediante el sistema integral se realiza de manera automática, de acuerdo al procesamiento de datos de todos los sensores de monitoreo, la generación de la información para el análisis e interpretación de los comportamientos de los taludes y la comparación de los resultados con los límites o umbrales definidos por los geotecnistas, de tal manera que el monitoreo al alcanzar los umbrales activan las alertas tempranas y actualiza los mapas de riesgos. Para esta investigación se han considerado las indicaciones de ingenieros geotecnistas y las especificaciones técnicas mínimas que debe cumplir un sistema de monitoreo geotécnico integral. La información de los indicadores se ha ingresado en las fichas de registro de datos de la variable 01 y dimensión 03 (ver anexo A fichas de registros de datos). Se han tomado en cuenta para este estudio los sensores de monitoreo, los cuales permiten generar los mapas de riesgos. Los datos de las fichas de registros se procesaron en la aplicación Microsoft Excel, mientras que el procesamiento de los datos de los sensores de monitoreo se ha realizado en el sistema de monitoreo geotécnico integral.

#### Análisis y resultados:

**Tabla 3.8:** Resultados del indicador módulos del sistema

I. MODULOS DEL SISTEMA	
INTEGRADOR	23
GEO INSPECTOR	19
MONITOREO	23
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	23
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	23
MAPA 2D-3D, ALERTAS Y REPORTES	23
La implementación de los módulos del sistema integral permitirá tener automatizados los procesos desde la captura de datos en campo hasta el procesamiento de datos, convirtiendo estos en información para la toma de decisiones. Como se observa en la gráfica los sensores estarán integrados aunque 19 de ellos sean manuales.	



**Tabla 3.9: Resultados del indicador umbrales de monitoreo**

II. DEFINICIÓN DE UMBRALES	
UMBRALES	23
<p>La definición de los umbrales o límites de tolerancia de desplazamiento de las medidas de los sensores es importante para determinar los seteos de alertas. Los datos de monitoreo en el tiempo ayudan a calibrar lo valores de los umbrales con la finalidad de obtener alerta más precisas y oportunas. Para cada tipo de sensor se debe establecer los umbrales, así como para los diferentes proyectos mineros.</p>	

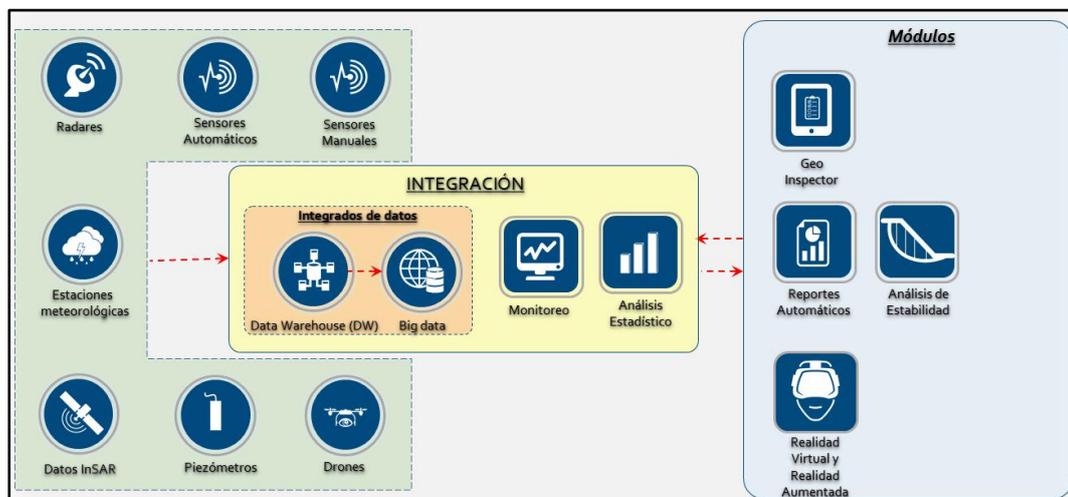
**Tabla 3.10: Resultados del indicador mapas de riesgos**

III. GENERACIÓN DE MAPAS	
MAPAS DE RIESGOS	23
ALERTAS	23
REPORTES AUTOMÁTICOS	23
<p>Con la implementación del sistema integral la generación de los mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes serán automáticos.</p>	

### 3.6 Recopilación de información y análisis de datos: Pos Prueba, con la implementación del sistema de monitoreo.

#### 3.6.1 Integración de sensores y los datos de monitoreo

En un servidor WEB externo, se implementó el sistema lográndose integrar los datos de los instrumentos automáticos y manuales en una sola base de datos centralizada a la cual se conectaron otros módulos para el procesamiento y análisis de la información.



Fuente: (IntellTech, 2017)

**Figura 3.8:** Diagrama de integración del sistema de monitoreo integral

#### Integración de todos los sensores en el Mapa 2D

Este formulario muestra la posición de todos los sensores de monitoreo integrados de la mina, de una manera intuitiva se pueden seleccionar los sensores y revisar las gráficas de todos ellos en una sola serie cronológica.

#### Integración de Mapa de radar IBIS más prismas y piezómetros

Muestra la integración de la imagen radar IBIS, el DTM de la mina, los prismas y piezómetros.

Cabe precisar que el periodo de integración tomo 02 días; pero una vez vinculados los datos el procesamiento y **resultados se obtienen en minutos**.

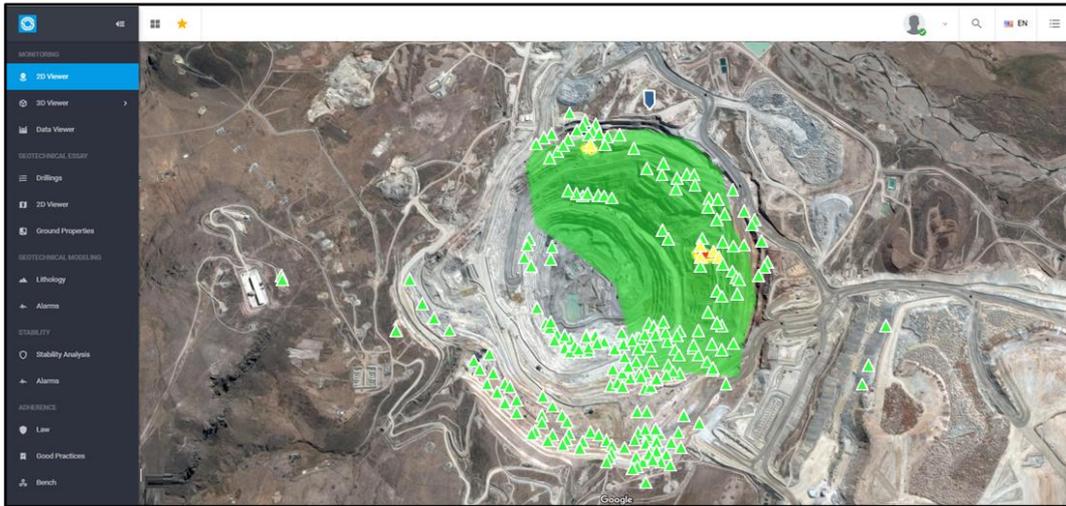


Figura 3.9: Mapa 2D de integración de todos los sensores

### 3.6.2 Análisis y resultados de los datos pos prueba de los sensores integrados

#### Datos, Cálculos y Resultados:

Del mapa 2D se seleccionan los sensores y se procesan automáticamente los desplazamientos acumulados, velocidades incrementales, series cronológicas y estadística descriptiva en gráficos de barra, histogramas y correlación de sensores.



Figura 3.10: Resultados mediante graficas estadísticas y series temporales

Generación automática de gráficos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones de los datos, con previsiones y tendencias de series temporales.



Figura 3.11: Resultados de series temporales de desplazamientos, velocidades

Análisis estadístico de los sensores de monitoreo: matriz de correlación de sensores, grafico de barras, grafica de desplazamiento y tabla estadística.

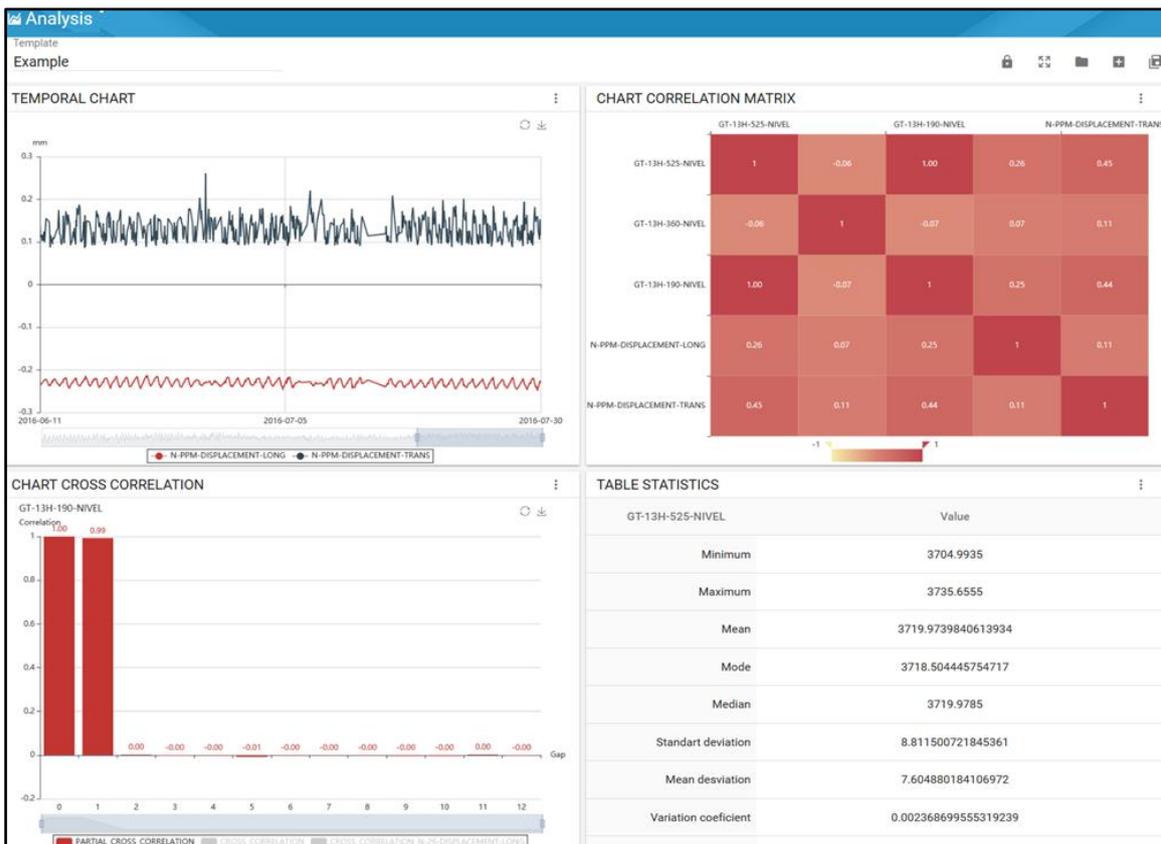


Figura 3.12: Resultados estadísticos de los sensores seleccionados en el mapa

Análisis de Estabilidad, debido a que el factor de seguridad presenta muchas incertidumbres no siendo una cifra muy confiable, entonces el sistema presenta el cálculo del factor de seguridad estadístico 2D basado en los métodos Bishop, Morgensten-Price y elementos finitos.

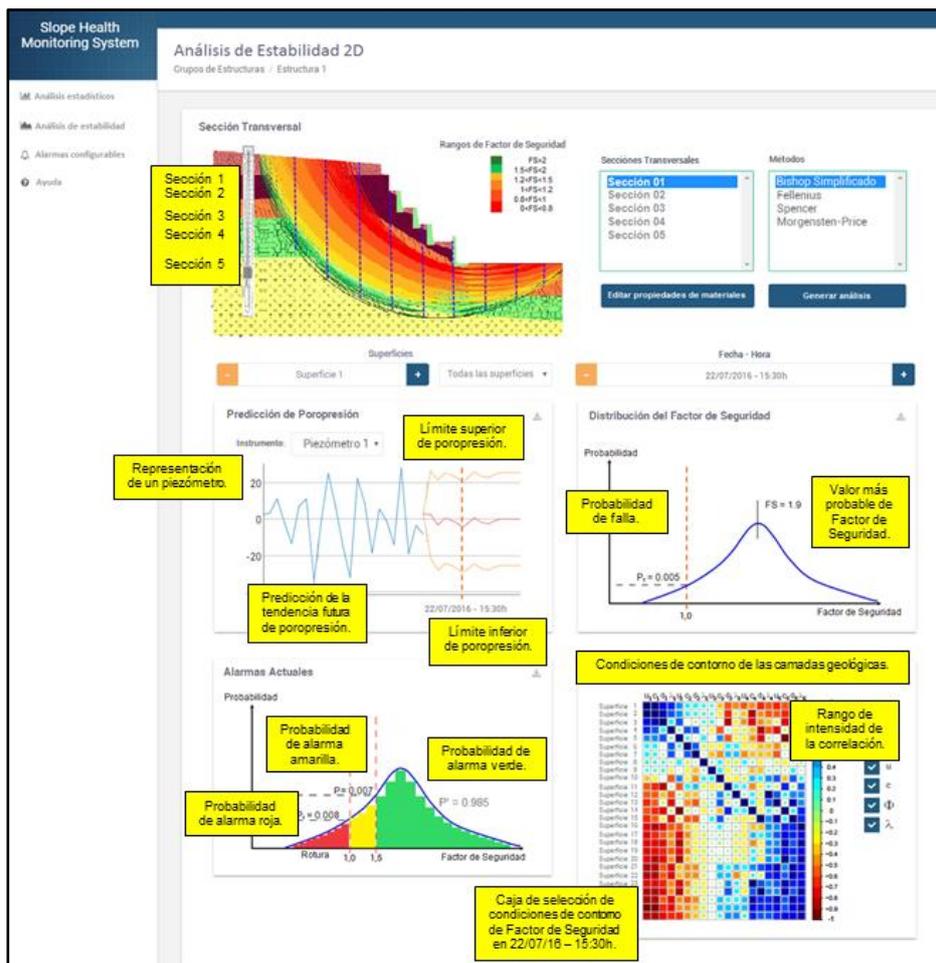
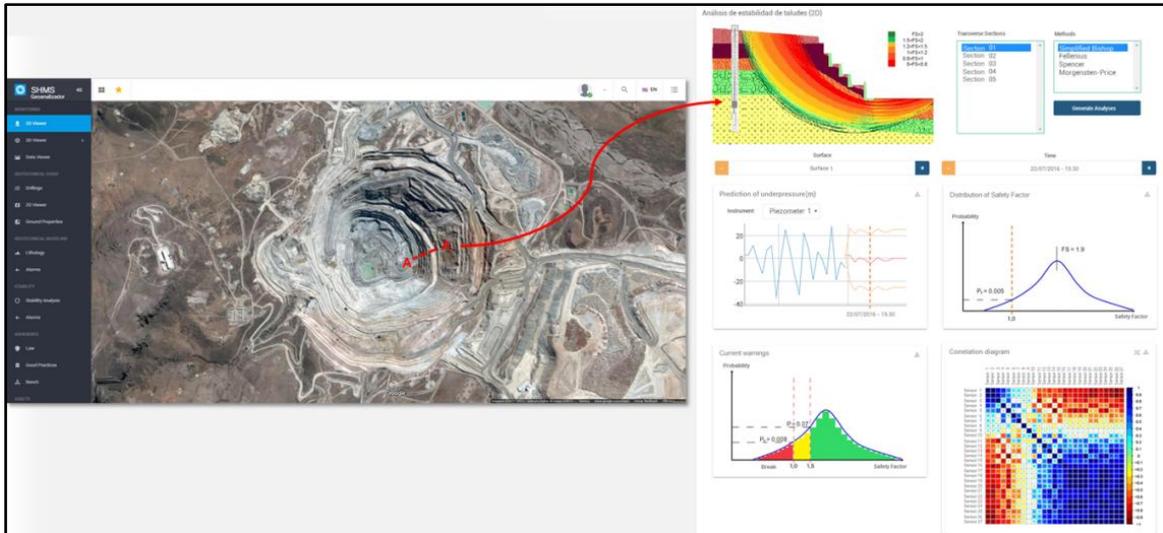


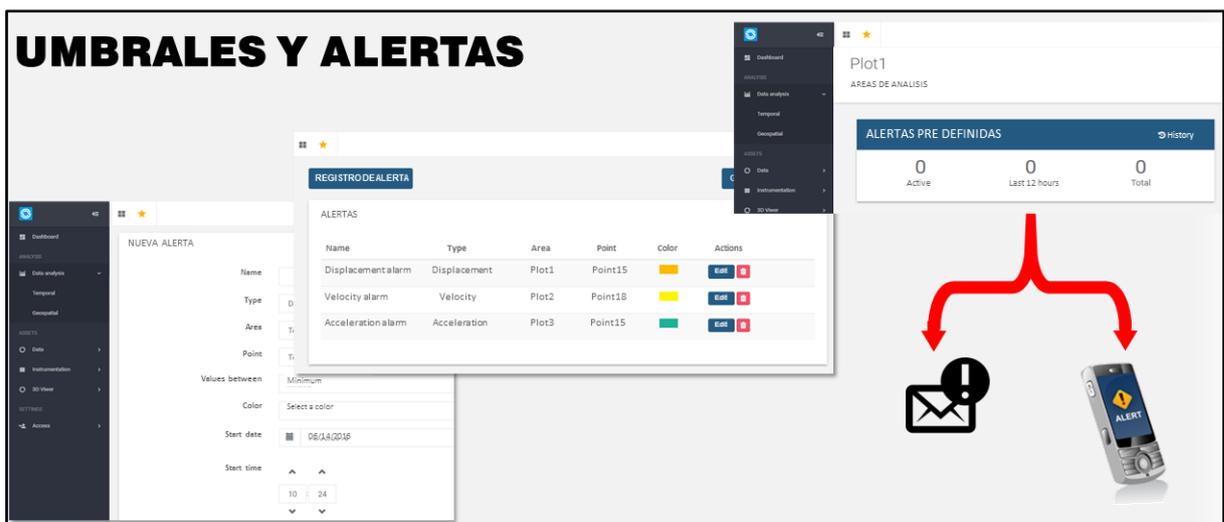
Figura 3.13: Resultados del análisis de estabilidad por métodos probabilísticos

Recolección de datos manuales, control de actividades y gestión de tareas, permite tener el control de la recolección de datos en campo y la administración de todos los procesos geotécnicos desarrollados en campo como mapeos, logeos, etc. Con la finalidad de integrarlos a la base centralizada y así complementar la información de los sensores automáticos.



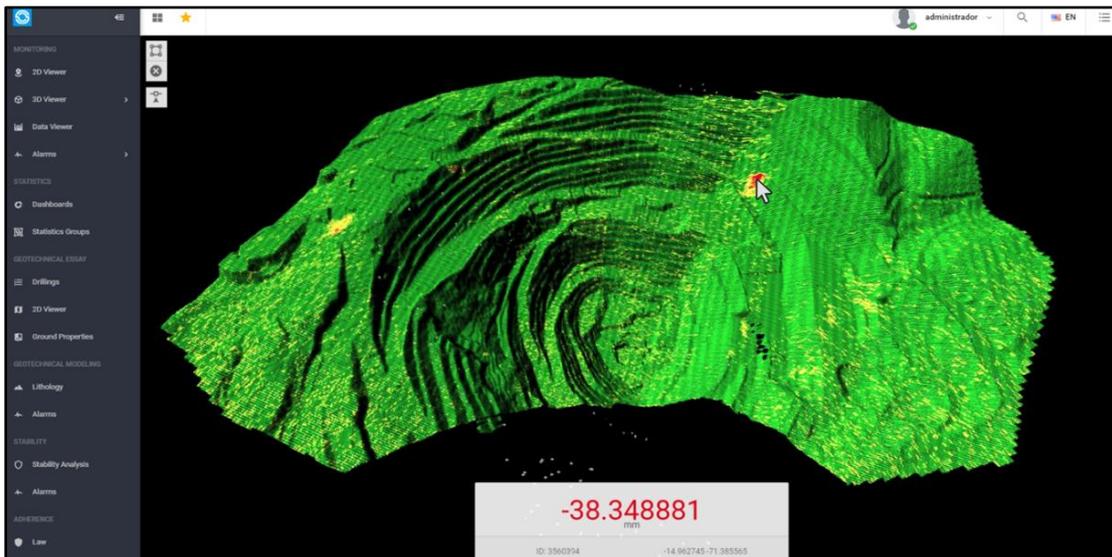
**Figura 3.14:** Dispositivos móviles para el registro de datos de campo

La definición de los umbrales es de responsabilidad directa de los geotecnistas de la mina, para este caso se está trabajando con umbrales referenciales definidos por el investigador en la tabla 2, los cuales permiten generar alertas tempranas de acuerdo al procesamiento de datos, generando mensajes por correo electrónico o SMS.



**Figura 3.15:** Interfaz donde se ingresan los umbrales de monitoreo

La generación de mapas de riesgos, muestra automáticamente el mapa de riesgos, de acuerdo a los umbrales definidos por los usuarios, generándose sectores de colores de acuerdo al grado de criticidad del comportamiento de taludes. Se observa un sector de color amarillo y rojo lo que indica que la alerta es crítica ya que el desplazamiento acumulado ha sobrepasado el máximo umbral, obteniéndose un desplazamiento acumulado.



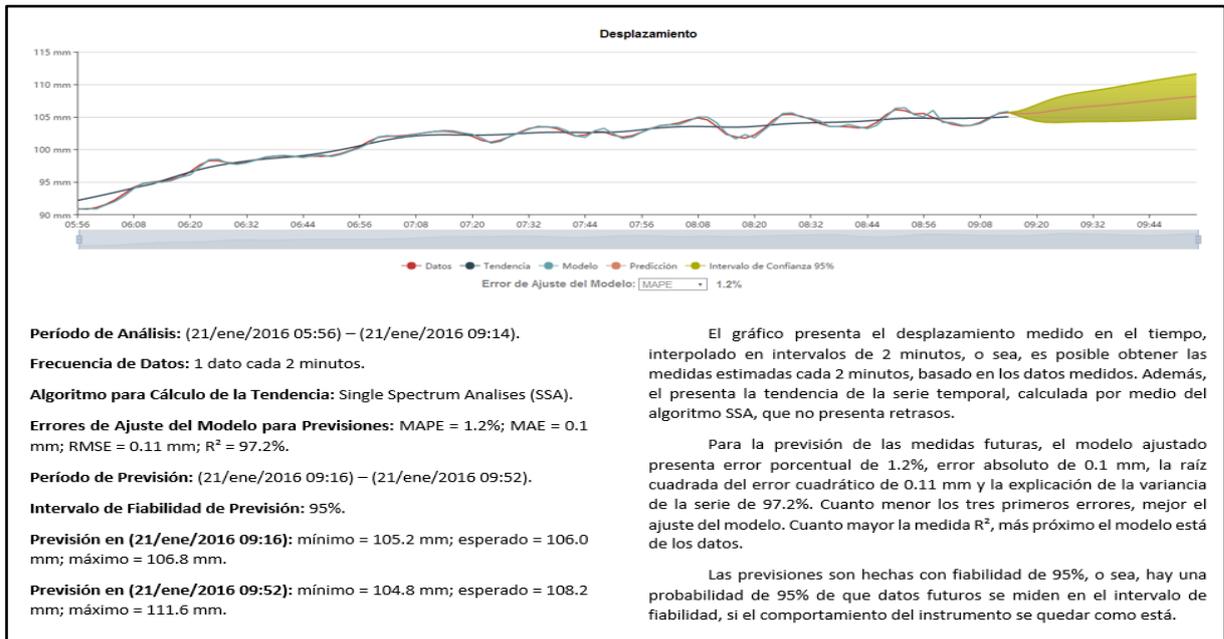
**Figura 3.16:** Mapa de riesgo de acuerdo a umbrales definidos

Realidad aumentada, los usuarios pueden observar desde campo la información del sistema, mediante tablets, smartphones y en smartwatches. Con la cámara fotográfica de estos equipos, se puede visualizar el mapa de riesgos de la mina.



**Figura 3.17:** Desde cualquier móvil conectado se ven mapas de riesgos

Los reportes automáticos, se generan tan solo realizando clics, los cuales presentan estadísticas, informaciones de inspección y acciones correctivas.



**Figura 3.18:** Generación de reportes automáticos en minutos

La generación de alertas tempranas en una central de control como el Dispatch geotécnico, que visualiza y controla los mapas de riesgo, alertas tempranas y reportes con la finalidad de detectar la aparición de zonas de inestabilidad en los taludes.



**Figura 3.19:** Sala de control de monitoreo 24 X 7.

### 3.7 Implementación de un Sistema de Monitoreo Geotécnico Integral

La gran cantidad de sensores geotécnicos que son necesarios emplear en la mina, para cubrir las exigencias en seguridad minera y las requeridas por las entidades normativas mediante el D.S. 024-2016-EM., generan un gran problema por la cantidad de datos que se deben procesar y analizar, así como también por los diversos estándares de los instrumentos que causan la descentralización de la data, no pudiendo correlacionar los sensores, tal como se mostró en los resultados de la etapa pre prueba, así como la formas de búsqueda para extraer información relevante, tomo algunas horas o días, no siendo eficiente el proceso de monitoreo manual o semi manual.

Por otro lado, los diseños de los taludes se hicieron en base al factor de seguridad, el cual depende del grado de incertidumbre de los parámetros determinados en laboratorio, generando un grado de desconocimiento de las propiedades del macizo rocoso en un 100%, por lo que, sí se sabe que pueden fallar los taludes se debe prever y para prever se debe hacer un monitoreo integral.

Por tales razones, que al alcanzar los tres objetivos específicos, propuestos para esta investigación, se confirma el cumplimiento del objetivo general, el cual permite implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral, cuya finalidad es evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina, gestionando la información geotécnica de manera eficiente con la finalidad de prever inestabilidades y tomar decisiones seguras.



Figura 3.20: Esquema de integración y gestión de monitoreo eficiente.

#### **IV. DISCUSIÓN**

## **IV. Discusión**

### **4.1 Discusión 1: Procedimientos para implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral**

Las investigaciones: Instrumentación geotécnica para el mejoramiento de la seguridad en taludes de rípios división Radomiro Tomic CODELCO Chile de (Cruces, 2014) y la Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo de (Vázquez, 2013), tomadas como antecedentes, en sus conclusiones muestran a algunos sensores de monitoreo geotécnico, los cuales trabajan de manera independiente sin ninguna integración de sus datos.

Los resultados obtenidos según las tablas 19, 20 y 21, donde muestran que: el 50% de los evaluados considera que la criticidad esperada frente a condiciones críticas de estabilidad puede determinar el cierre de la mina; el 65% considera que el sistema de comunicación WI FI es el más apropiado para el envío de información de los sensores de campo a la base central y un 40% considera que los análisis de movimientos en tiempo real son vitales en el control de las operaciones mineras.

Actualmente existen pocas mineras en el mundo que cuentan con sistemas de monitoreo geotécnicos integrales (SafeLand, 2012), mientras que en el Perú aún no hay ninguna minera que lo tenga, es por esta razón que para establecer los procedimientos de implementación del sistema, no se cuenta con mucha información al respecto, es por ello que se ha trabajado con los especialistas en monitoreo geotécnico y tecnología de información de las principales minas, para establecer los mejores criterios que permitan considerar los principales aspectos de una implementación de sistema de monitoreo. Es por ello que se han considerado tres criterios a evaluar por los especialistas de mina, siendo estos: la estrategia de monitoreo, el sistema de comunicación y los criterios para ubicar los sensores y analizar los datos de los movimientos.

Por lo que, esta investigación adicionalmente complementa e indica los procedimientos para la implementación de un sistema de monitoreo integral, que

permite procesar y correlacionar los datos de los todos los sensores de monitoreo instalados en la mina, permitiendo implementar el sistema de monitoreo integral.

#### **4.2 Discusión 2:** Características de los sensores de monitoreo

El cumplimiento de las características de los sensores de monitoreo, en los antecedentes, solo es planteada de manera parcial, tal como la indican las investigaciones: Instrumentación geotécnica para el mejoramiento de la seguridad en taludes de rípios división Radomiro Tomic CODELCO Chile de (Cruces, 2014); Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo de (Vázquez, 2013) y Análisis y diseño de taludes mediante métodos computacionales de (Morales, 2000).

En esta investigación se han considerado sensores de monitoreo, los cuales se encuentran instalados en la mina, según las tablas 22, 23 y 24, nos muestran que de los sensores de monitoreo en campo 21 de ellos cumple con la característica de confiabilidad, robustez y funcionamiento a largo plazo; además como la mayoría de instrumentos realizan trabajos de control de los niveles de agua, debido a que es un factor desencadenante en la inestabilidad de los taludes, se han asignado 10 de 23 sensores para el control de la presión de poros y también 19 sensores han sido destinados al monitoreo geotécnico de la mina.

Desde el inicio de las operaciones mineras, geotécnicamente se recomienda que se instalen sensores de monitoreo geotécnico, cuyos datos deben permitir identificar las inestabilidades en los taludes que puedan transformarse en deslizamientos, para lo cual estos sensores deben cumplir con características que permitan medir con precisión y confiabilidad las variables de control de los taludes como son los desplazamientos, velocidades y aceleraciones (González de Vallejo, 2002).

Por lo que, esta investigación indica las características que deben cumplir los instrumentos, así como los procedimientos de instalación, configuración y mantenimiento con la finalidad que mantengan siempre la precisión en la captura de los datos.

### **4.3 Discusión 3:** Generación de mapas de riesgos

Ninguna de las investigaciones tomadas como antecedentes, plantea la generación automática de los mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes automáticos.

La generación de mapas de riesgos automáticos lo realiza el sistema de monitoreo geotécnico integral, el cual ha cumplido con la implementación de los módulos del sistema, definición de umbrales y la generación de mapas de riesgos, alertas y reportes automáticos, cuyos resultados se muestran en las tablas 25, 26 y 27. Los resultados muestran que los sensores de monitoreo se han podido integrar y sus datos son guardados en la única base de datos centralizada y donde otros módulos del sistema generan información la cual es comparada con los umbrales definidos por los usuarios y en base a los cuales se generan los mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes automáticos.

El manejo de los datos de los sensores, el análisis de la información y la comparación de los resultados con los umbrales definidos por los geotecnistas sobre el macizo rocoso de la mina, el sistema de monitoreo geotécnico integral, ha zonificado y clasificado por colores en el mapa 2D y 3D los riesgos potenciales que se pueden presentar en los taludes de la mina (IntellTech, 2016).

Esta investigación muestra la generación automática y en tiempo real de los resultados mediante mapas de riesgos, con la finalidad que proporcione información gráfica al personal de la operación minera y a las entidades auditoras, minimizando el riesgo de exposición del personal, infraestructura y equipos.

### **4.4 Discusión 4:** Implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral.

Ninguna de las investigaciones tomadas como antecedentes plantea la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral, que evalúa el comportamiento de los taludes de forma automática y genera automáticamente los mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes, que son la información vital, para la evaluación del comportamiento de los taludes.

De acuerdo a los resultados obtenidos entre las tablas 19 a la 27 respectivamente y a los resultados eficientes de la etapa pos prueba, se

demuestra que para implementar el sistema de monitoreo geotécnico integral, se ha cumplido con establecer los procedimientos, determinado las características de los sensores y la integración de los mismos con la base de datos central.

La gran cantidad de datos que generan los sensores de monitoreo hacen imposible su procesamiento en tiempo real, debiéndose aplicar el monitoreo integral (IntellTech, 2016).

Los diseños de los taludes se realizan en base a los factores de seguridad, los cuales dependen de la incertidumbre de los parámetros determinados en laboratorio, generando un grado de desconocimiento de las propiedades del macizo rocoso en un 100%, por lo que, se debe aplicar probabilidades de falla y para ello se deben medir continuamente los taludes con el monitoreo integral.

El problema presentado cuando se monitoreaba y procesaba manualmente en la mina se mejora, debido a la integración de los sensores y al procesamiento de los datos en el sistema de monitoreo geotécnico integral, cumpliendo de esta manera el objetivo de evaluar el comportamiento de los taludes en tiempo real, así como la generación de mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes automáticos en minutos.

La norma actual sobre Seguridad y Salud Ocupacional en minería D.S. 024-2016-EM, no precisa la forma en que deben realizarse los monitoreos geotécnicos integrales, llevándose a cabo procesos de auscultación manuales, no siendo estos la solución para evitar problemas y accidentes en las operaciones mineras, debido a que no presentan la información en tiempo real.

## **V. CONCLUSIONES**

## **V. Conclusiones**

### **5.1 Conclusión 1:** Procedimientos para implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral

Establecer los procedimientos como: las estrategias de monitoreo, que consideran, según el 50% de los evaluados, que la criticidad esperada frente a condiciones críticas de estabilidad puede determinar el cierre de la mina; entretanto el 65% indica que el sistema de comunicación WI FI es el más apropiado para el envío de información de los sensores de campo a la base central y un 40% valora que los análisis de movimientos en tiempo real son vitales para evaluar, controlar, analizar e interpretar el comportamiento de los taludes en tiempo real.

### **5.2 Conclusión 2:** Características de los sensores de monitoreo

Geotécnicamente se recomienda que desde el inicio de las operaciones mineras, se instalen sensores de monitoreo geotécnico, los cuales deben cumplir determinadas características como la confiabilidad, robustez y funcionamiento a largo plazo, demostrándose su cumplimiento con los sensores que se han empleado en esta investigación; asimismo se han designado 10 sensores para el monitoreo de los niveles freáticos, porque la presencia del agua, es un causa desencadenante en el equilibrio de los taludes, así como para el monitoreo geotécnico superficial se han destinado 19 sensores, para el control de los desplazamientos y velocidades.

### **5.3 Conclusión 3:** Generación de mapas de riesgos

La integración de los datos de los sensores de monitoreo de la mina, el procesamiento en los módulos del sistema, el análisis de la información y la comparación de los resultados con los umbrales definidos por los geotecnistas, han permitido zonificar y clasificar por colores en el mapa 2D y 3D los riesgos potenciales que se pueden presentar en los taludes del tajo abierto de la mina, generando también alertas tempranas y reportes automáticos.

#### **5.4 Conclusión 4:** Implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral

El factor de seguridad no permite tener con certeza el 100% de los parámetros geotécnicos y los esfuerzos que actuarán sobre los taludes por lo que las mediciones obtenidas en la etapa pos prueba de esta investigación demuestran que después de implementar el sistema de monitoreo geotécnico se ha integrado los datos de los sensores de la mina en una sola base centralizada, permitiendo procesarlos automáticamente, evaluar el comportamiento de los taludes mediante la predicción de los deslizamientos y la generación en tiempo real los mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes, reduciendo la generación de estos resultados de días a minutos, cumpliendo de manera eficiente y precisa el monitoreo que se exigen las entidades auditoras y lo requerido por el D.S. 024-2016-EM.

## **VI. RECOMENDACIONES**

## **VI. Recomendaciones**

### **6.1 Recomendación 1:** Procedimientos para implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral

Se recomienda al Ministerio de Energía y Minas, a la Gerencia de Fiscalización minera del Osinergmin, así como a las compañías mineras, incluir los procedimientos establecidos para la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral, indicando: las estrategias de monitoreo, los sistema de comunicaciones a emplear y cumplir con criterios para la ubicación de los sensores y el control para el análisis e interpretación de la información; incorporándolos en el D.S.024-2016-EM, con la finalidad de mejorar la seguridad en la mina.

### **6.2 Recomendación 2:** Características de los sensores de monitoreo

Se sugiere al Ministerio de Energía y Minas, a la Gerencia de Fiscalización minera del Osinergmin, así como a las compañías mineras, considerar las características de los sensores de monitoreo que están expuestos en campo a condiciones adversas y que se enlazaran al sistema de monitoreo geotécnico integral; incorporándolas en el D.S.024-2016-EM, con la finalidad de mejorar la seguridad en la mina.

### **6.3 Recomendación 3:** Generación de mapas de riesgos

Se recomienda al Ministerio de Energía y Minas, a la Gerencia de Fiscalización minera del Osinergmin, así como a las compañías mineras, establecer la generación de los mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes automáticos; incorporándolos en el D.S.024-2016-EM, con la finalidad de mejorar la seguridad en la mina.

#### **6.4 Recomendación 4:** Implementación sistema de monitoreo geotécnico integral

Se recomienda al Ministerio de Energía y Minas, a la Gerencia de Fiscalización minera del Osinergmin, así como a las compañías mineras a complementar al empleo del factor de seguridad, el monitoreo mediante la implementación los sistemas de monitoreo geotécnico integrales, los cuales permiten vincular a todos los datos de los sensores, procesar y correlacionar los datos, predecir deslizamientos y generar en tiempo real los mapas de riesgos, alertas tempranas y reportes automáticos, incorporándolos en el D.S.024-2016-EM, con la finalidad de mejorar la seguridad en la mina, mediante la evaluación permanente del comportamiento de los taludes y su rediseño constante.

#### **6.5 Recomendación 5:** Emplear imágenes radar satelital

Se recomienda al Ministerio de Energía y Minas, a la Gerencia de Fiscalización minera del Osinergmin, así como a las compañías mineras, para que empleen la tecnología de monitoreo por satélite InSAR, que permite tener el control de los movimientos del terreno o estructuras a nivel regional, con lo cual se detectan zonas o sectores inestables, los cuales no podrán ser percibidos fácilmente, una vez identificados se complementan con los sistemas de monitoreo estudiados en esta investigación; incorporándolos en el D.S.024-2016-EM, con la finalidad de mejorar la seguridad en la mina y sus alrededores.

## **VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## VII. Referencias bibliográficas

1. ARIAS, Fideas. El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica. 6.<sup>a</sup> ed. Caracas: Episteme, 2012. 142 pp.  
ISBN: 9800785299
2. BAÑÓN, Luis y BEVIÁ, José. Manual de carreteras. Alicante: Editorial Ortíz e hijos, Contratistas de Obra S.A., 2000. Vol. 2, [328] pp.  
ISBN: 8460701239.
3. BIENIAWSKI, Z.T. Engineering rock mass classifications. s.l. : John Wiley & Sons, 1989. 251 pp.
4. BORJA, Manuel. Metodología de la investigación científica para ingenieros. Chiclayo : s.n., 2012. 38 pp.
5. BRAJA, Das. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. 4.<sup>a</sup> ed. Querétaro : Art, 2014. 636 pp.  
ISBN: 9786075193724
6. CANOBA, Carlos. Propiedades elásticas de las rocas. Rosario, Argentina : Universidad Nacional del Rosario, 2004. 12 pp.
7. Centro de Investigación UCV, Universidad César Vallejo. Manual de instrucciones para la elaboración del proyecto de tesis. Lima : Fondo Editorial UCV, 2013. 78 pp.
8. CRUCES Seguel, Hernaldo. Instrumentación geotécnica para el mejoramiento de la seguridad en taludes de rípios división Radomiro Tomic CODELCO Chile. Tesis (Ingeniero Civil Industrial en Minas). Antofagasta: Universidad de Antofagasta, Facultad de Ingeniería, 2014. 102 pp.
9. CRUDEN D.M. A simple definition of a landslide. Edmonton: s.n., 1991.  
ISSN: 14359529.
10. DUNCAN, Wyllie y CHRISTOPHER, Mah. Rock Slope Engineering Civil and Mining. 4.<sup>a</sup> ed. New York : Taylor & Francis Group, 2005. 431 pp.  
ISBN: 0203570839.
11. GIANCOLI, Douglas. 2008. Física para Ciencias e Ingenierías. 4.<sup>a</sup> ed. Ciudad de México: Pearson, 2008. Vol. I, 635 pp.

12. INGENIERÍA Geológica por Luis Gónzales de Vallejo [*et al.*]. Madrid: Pearson Educación S.A., 2002. 744 pp.  
ISBN: 8420531049.
13. HERNÁNDEZ, Roberto, FERNÁNDEZ, Carlos y BAUTISTA, Pilar. Metodología de la investigación. 6.<sup>a</sup> ed. México D.F.: MacGraw-Hill, Interamericana Editores S.A. de C.V., 2014. 613 pp.  
ISBN: 9786071502919
14. HOEK E. Geological Strength Index. Criterio de rotura de Hoek-Brown. Minnesota: s.n., 2002. 8 pp.
15. IDS Ingegneria dei Sistemi. Training Course IBIS FM Image by interferometric survey. Pisa, Italia: IDS, 2012. 297 pp.
16. INSTITUTO Geológico y Minero de España. 1986. Manual de taludes. Madrid : IGME, 1986. 456 pp.
17. IntellTech. Slope Health Monitoring System. Foz de Iguazu, Brasil: Intelltech, 2017. 178 pp.
18. JEREZ Salan, Carlos. Modelo de monitoreo de asentamientos en las explanadas de la vía Tosagua-Chone, en los humedales y zonas inundables para estabilizar la obra geotécnico de la vía. Tesis (Magister en vías terrestres). Ambato : Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Centro de Estudios de Posgrado, 2009. 114 pp.
19. Leica Geosystems. Manual de usuario Leica TS30/TM30. Heerbrugg : Leica Geosystems AG, 2009. 215 pp.
20. Leica Geosystems. User manual Leica GMX901 Plus. Heerbrugg, Suiza : Leica Geosystems, 2013. 28 pp.
21. LEIVA, Humberto. FÍSICA I: Teoría y problemas resueltos. s.l. : Moshera, 2009. 771 pp.
22. MENDOZA Salas, Marco. Instrumentación para el monitoreo de obras civiles. Tesis (Ingeniero Civil). México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2011. 148 pp.

23. MORALES Cabrera, Dante. Análisis y diseño de taludes Mediante Métodos Computacionales. Tesis (Maestro en Ciencias con mención en Ingeniero de minas). Lima : Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, Sección de postgrado (Lima), 2000. 128 pp.
24. MOYA, Rufino. Estadística Descriptiva. s.l. : San Marcos, 2002.
25. OLIVARES Sánchez, Laura. Aspectos básicos sobre los sistemas de monitoreo continuo aplicada a las obras de ingeniería civil. Tesis (Ingeniería Civil). México, D.F. : Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2012. 171 pp.
26. OSEDA, Dulio. Metodología de la investigación. Huancayo: Pirámide, 2011.
27. PACHECO Zapata, Arturo. Estabilización del talud de la Costa Verde en la zona distrito de San Isidro. Tesis (Ingeniero Civil). Lima : Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2006. 88 pp.
28. PAREDES Lopez, Euler Daniel. Cálculo del inicio de velocidad de colapso de la falla del botadero de Tucush en la mina Antamina, año 2010. Tesis (Ingeniero de minas). Huaraz : Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo, Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Metalúrgica, 2013. 104 pp.
29. QUALICON Latam. Estabilidad de taludes para minería y construcción. Lima : Qualicon, 2015. [190] pp.
30. RAMIREZ Oyaguren, Pedro y ALEJANO Monge, Leandro. Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes. Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2004. 711 pp.
31. READ, Jhon y STACEY, Peter. Guidelines for open pit Slope design. Collingwood: Printing International Ltd., 2009. 496 pp.  
ISBN: 9780415874410
32. RODRIGUEZ Copare, José, MORALES Cabrera, Dante y PAREDES Lupaca, Luisa. Evaluación de la estabilidad de taludes en la mina Lourdes. Tesis (Ingeniero de minas). Tacna, Perú : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Facultad de Ingeniería de Minas, 2003. 85 pp.
33. SafeLand. Living with landslide risk in Europe. 2012.

34. SÁNCHEZ, H. y REYES, C. Metodología y diseño de la investigación científica. Lima: Visión Universitaria, 2006.
35. SUAREZ Diaz, Jaime. Deslizamientos - Análisis Geotécnico. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda., 2009. Vol. 1, 582 pp.
36. SUAREZ-BURGOA, Ludger. Descripción del macizo rocoso. 2.<sup>a</sup> ed. Medellín : s.n., 2014. 40 pp. e-ISBN: 9789584643056.
37. TUTORIA de la investigación por Terán [et al]. Guayaquil: s.n., 2008.
38. VARNES, D.J.. Landslide hazard zonation a review of principles and practice. París : UNESCO Press, 1984. 63 pp.
39. VÁZQUEZ Roura, Alfredo. Investigación de deslizamientos a través de métodos geofísicos y técnicas de monitoreo. Tesis (Ingeniería Civil). Cuenca, Ecuador : Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería Civil, 2013. 129 pp.
40. VILLENA, Rafa. Antenas para todos. 2008.

Anexos:

## Anexo A. Instrumentos



### CARTA DE PRESENTACIÓN

Señor: JHONATAN SAUL BERNAL FERNANDEZ (Validador 01)  
Presente

Asunto: Validación de instrumentos a través de juicio de experto.

Me es muy grato, comunicarme con usted para expresarle mi saludo y así mismo, hacer de su conocimiento que siendo estudiante del programa de formación para adultos SUBE de la EAP de Ingeniería Civil en la sede Lima Norte, requiero validar los instrumentos con los cuales recogeré información necesaria para poder desarrollar mi investigación y con la cual optaremos el grado de Ingeniero Civil.

El título de mi proyecto de investigación es: Implementación del Sistema de Monitoreo Geotécnico Integral para evaluar el comportamiento de taludes, en la mina Antapaccay, región Cusco - 2017 y siendo imprescindible contar con la aprobación de docentes especializados para poder aplicar los instrumentos en mención, hemos considerado conveniente recurrir a usted, ante su connotada experiencia en temas educativos y/o investigación educativa.

El expediente de validación, que le hacemos llegar contiene:

- Carta de presentación.
- Definiciones conceptuales de las variables y dimensiones.
- Matriz de operacionalización de las variables.
- Certificado de validez de contenido de los instrumentos.

Expresándole nuestros sentimientos de respeto y consideración nos despedimos de usted, no sin antes agradecerle por la atención que dispense a la presente.

Atentamente.

---

Firma  
Rea Olivares, Walter Manuel  
DNI: 15300965

## CARTA DE PRESENTACIÓN

Señor: JOSÉ M. BRUNO AMAYA (Validador 02)

Presente

Asunto: Validación de instrumentos a través de juicio de experto.

Me es muy grato, comunicarme con usted para expresarle mi saludo y así mismo, hacer de su conocimiento que siendo estudiante del programa de formación para adultos SUBE de la EAP de Ingeniería Civil en la sede Lima Norte, requiero validar los instrumentos con los cuales recogeré información necesaria para poder desarrollar mi investigación y con la cual optaremos el grado de Ingeniero Civil.

El título de mi proyecto de investigación es: Implementación del Sistema de Monitoreo Geotécnico Integral para evaluar el comportamiento de taludes, en la mina Antapaccay, región Cusco - 2017 y siendo imprescindible contar con la aprobación de docentes especializados para poder aplicar los instrumentos en mención, hemos considerado conveniente recurrir a usted, ante su connotada experiencia en temas educativos y/o investigación educativa.

El expediente de validación, que le hacemos llegar contiene:

- Carta de presentación.
- Definiciones conceptuales de las variables y dimensiones.
- Matriz de operacionalización de las variables.
- Certificado de validez de contenido de los instrumentos.

Expresándole nuestros sentimientos de respeto y consideración nos despedimos de usted, no sin antes agradecerle por la atención que dispense a la presente.

Atentamente.

---

Firma  
Rea Olivares, Walter Manuel  
DNI: 15300965

## CARTA DE PRESENTACIÓN

Señor: JANETT F. ARTEGA HERRERA (Validador 03)

Presente

Asunto: Validación de instrumentos a través de juicio de experto.

Me es muy grato, comunicarme con usted para expresarle mi saludo y así mismo, hacer de su conocimiento que siendo estudiante del programa de formación para adultos SUBE de la EAP de Ingeniería Civil en la sede Lima Norte, requiero validar los instrumentos con los cuales recogeré información necesaria para poder desarrollar mi investigación y con la cual optaremos el grado de Ingeniero Civil.

El título de mi proyecto de investigación es: Implementación del Sistema de Monitoreo Geotécnico Integral para evaluar el comportamiento de taludes, en la mina Antapaccay, región Cusco - 2017 y siendo imprescindible contar con la aprobación de docentes especializados para poder aplicar los instrumentos en mención, hemos considerado conveniente recurrir a usted, ante su connotada experiencia en temas educativos y/o investigación educativa.

El expediente de validación, que le hacemos llegar contiene:

- Carta de presentación.
- Definiciones conceptuales de las variables y dimensiones.
- Matriz de operacionalización de las variables.
- Certificado de validez de contenido de los instrumentos.

Expresándole nuestros sentimientos de respeto y consideración nos despedimos de usted, no sin antes agradecerle por la atención que dispense a la presente.

Atentamente.

---

Firma  
Rea Olivares, Walter Manuel  
DNI: 15300965

## **Definición conceptual de las variables y dimensiones**

### **Variable 1:**

#### **Sistema de monitoreo geotécnico integral**

Un sistema de monitoreo integral, es un grupo de módulos que se vinculan para permitir la centralización e integración de los instrumentos de monitoreo, proporcionando mediciones sistemáticas repetitivas de una posición o sector; considerándose un monitoreo casi en tiempo real, si las medidas son más continuas, permitiendo la generación de alertas tempranas para minimizar los riesgos y deslizamientos potenciales que originan pérdidas materiales y humanas (SafeLand, 2012).

#### **Dimensiones de las variables:**

##### **Dimensión 1:**

Procedimientos para implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral

Estrategia de monitoreo, Sistemas de comunicación, Criterios de ubicación de los instrumentos y parámetros de medición.

##### **Dimensión 2:**

Características de los sensores de monitoreo

Técnicas de monitoreo, Características de sensores, Tipos de sensores.

##### **Dimensión 3:**

Generación de mapas de riesgos

Módulos del sistema, Umbrales de alertas, Mapas de riesgos, alertas y reportes.

## **Definición conceptual de las variables y dimensiones**

### **Variable 2:**

#### **Comportamiento de taludes**

El comportamiento de taludes en macizos rocosos, son actividades complicadas que suceden en el talud en base a los factores que gobiernan su estabilidad (González de Vallejo et al., 2002).

#### **Dimensiones de las variables:**

##### **Dimensión 1:**

Factores geológicos, geométricos, geotécnicos

Desplazamientos, velocidades, aceleraciones

##### **Dimensión 2:**

Factores hidrogeológicos

Nivel freático, presión de poros, direcciones de flujos

##### **Dimensión 3:**

Factores climáticos

Temperatura, precipitaciones, humedad

## Matriz de operacionalización de las variables

Variable 1

Sistema de Monitoreo Geotécnico Integral

<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumentos / Ítems</b>	<b>Escala de medición</b>
<b>Procedimientos para implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral</b>	Estrategia de monitoreo	Ficha de registro de datos de las estrategias de monitoreo.	<b>Razón</b>
	Sistemas de comunicación	Ficha de registro de datos de los sistemas de comunicación.	
	Criterios de ubicación de los instrumentos y parámetros de medición.	Ficha de registro de los criterios de ubicación de instrumentos.	
<b>Características de los sensores de monitoreo</b>	Técnicas de monitoreo.	Ficha de registro de datos de las técnicas de monitoreo.	
	Características de sensores	Ficha de registro de las características de los sensores.	
	Tipos de sensores	Ficha de registro de los tipos de sensores.	
<b>Generación de mapas de riesgos</b>	Módulos del sistema	Ficha de registro de los módulos del sistema.	
	Umbral de alertas.	Ficha de registro de los umbrales	
	Mapas de riesgos, alertas y reportes.	Ficha de registro de los mapas de riesgos.	



### Matriz de operacionalización de las variables

Variable 2

Comportamiento de taludes

<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumentos / Ítems</b>	<b>Escala de medición</b>
<b>Factores geológicos, geométricos y geotécnicos</b>	Desplazamientos Velocidades Aceleraciones	Ficha de registro de datos para la medición con los sensores superficiales: Radares, Estaciones Totales, Extensómetros.  Ficha de registro de datos para el cálculo de desplazamientos, velocidades y aceleraciones.	<b>Razón</b>
<b>Factores hidrogeológicos</b>	Nivel freático Presión de poros Direcciones de flujo	Ficha de registro de datos para la medición con los sensores hidrogeológicos: Piezómetros	
<b>Factores climáticos</b>	Temperatura Precipitaciones. Humedad relativa del aire	Ficha de registro de datos para la medición con los sensores climatológicos: Estaciones meteorológicas	

## Anexo B. Validación de instrumentos

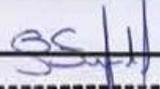
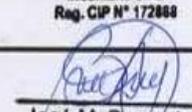
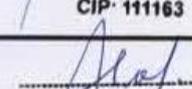


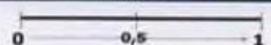
### ANÁLISIS DE VALIDEZ Y CONFIABILIDAD

(Clasificación según: Oseda Gago, 2011)

PROYECTO	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MONITOREO GEOTÉCNICO INTEGRAL PARA EVALUAR EL COMPORTAMIENTO DE TALUDES EN LA MINA ANTAPACCA Y. REGIÓN CUSCO. 2107.
AUTOR	WALTER MANUEL REA OLIVARES

VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN		VAL. 1	VAL. 2	VAL. 3
<b>V1</b>	<b>SISTEMA DE MONITOREO GEOTÉCNICO INTEGRAL</b>			
<b>D1</b>	<b>PROCEDIMIENTOS PARA IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE MONITOREO</b>	1.00	1.00	0.93
	Establecer la estrategia de monitoreo Establecer sistemas de comunicación Establecer criterios de ubicación de instrumentos y parámetros de med.			
<b>D2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DE MONITOREO</b>	1.00	1.00	0.95
	Técnicas de monitoreo Características de los sensores Tipos de sensores			
<b>D3</b>	<b>GENERAR MAPAS DE RIESGOS</b>	1.00	1.00	0.92
	Módulos del sistema de monitoreo geotécnico integral Umbral de alertas Mapas de riesgos, alertas y reportes automáticos			
<b>V2</b>	<b>COMPORTAMIENTO DE TALUDES</b>			
<b>D1</b>	<b>FACTORES GEOLÓGICOS, GEOMÉTRICOS Y GEOTÉCNICOS</b>	1.00	1.00	0.90
	Desplazamientos Velocidades Aceleraciones			
<b>D2</b>	<b>FACTORES HIDROGEOLÓGICOS</b>	1.00	1.00	0.95
	Nivel Freático Presión de poros Dirección de flujos			
<b>D3</b>	<b>FACTORES CLIMÁTICOS</b>	1.00	1.00	1.00
	Temperaturas Precipitaciones Humedad			
<b>TOTALES</b>		1.00	1.00	0.94
				0.98

VALIDADOR 01:	 ----- JHONATAN SAUL BERNAL PERNANDEZ INGENIERO CIVIL Reg. CIP N° 172888
VALIDADOR 02:	 ----- José M. Bruno Amaya Ingeniero Civil CIP: 111163
VALIDADOR 03:	 ----- Janett F. Arteaga Herrera INGENIERO CIVIL CIP. N° 111327

Calificación según Oseda 2011:	
	
<sup>1</sup> Validez nula:	0,53 a menos
<sup>2</sup> Validez baja:	0,54 a 0,59
<sup>3</sup> Valida:	0,60 a 0,65
<sup>4</sup> Muy Válida:	0,66 a 0,71
<sup>5</sup> Excelente Validez:	0,72 a 0,99
<sup>6</sup> Validez perfecta:	1,00

Nota: La validez debe ser superior a 0,80, se dice que es válido cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión.

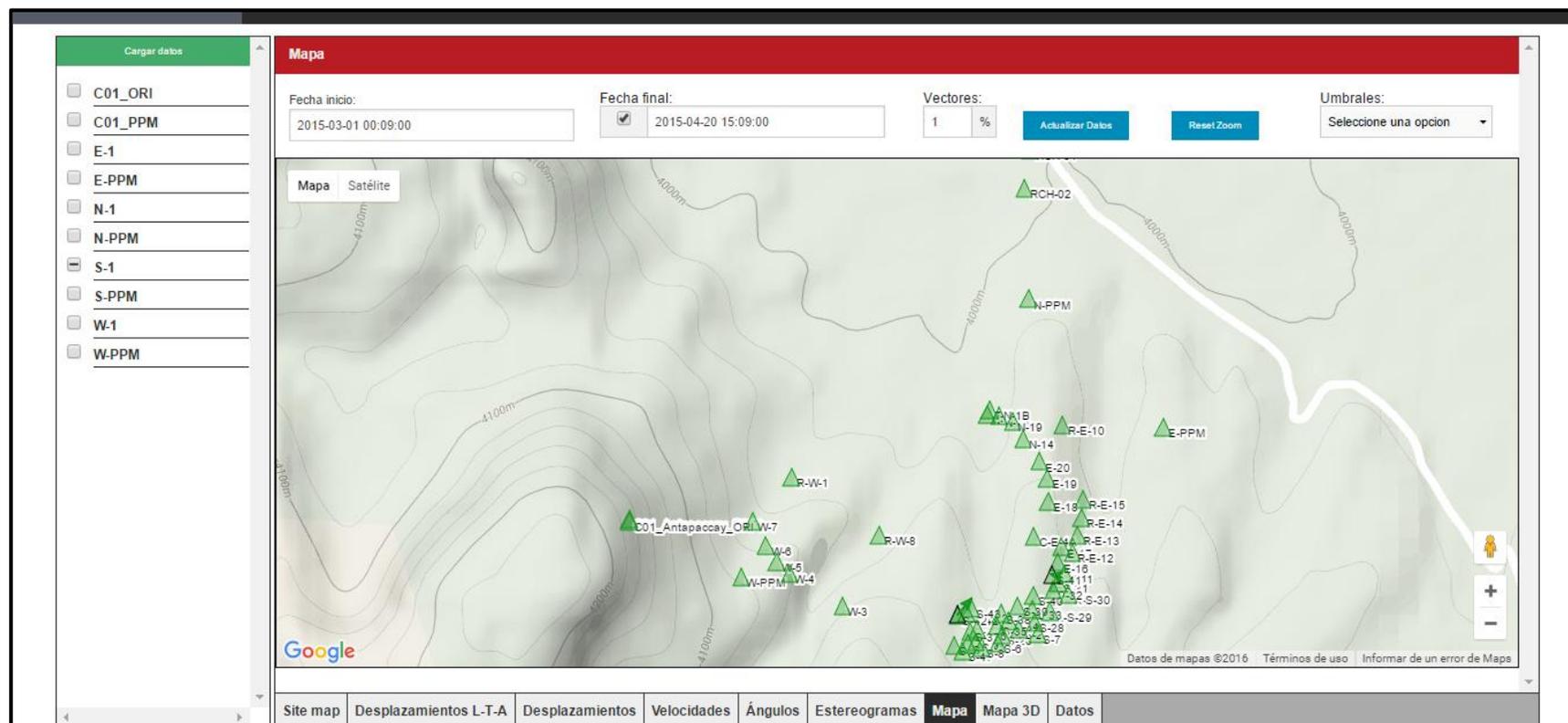
## Anexo C. Matriz de consistencia

Implementación del sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de taludes en la mina Antapaccay, Región Cusco, en el año 2017.								
FORMULACION DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES			METODOLOGÍA		
<p><b>PROBLEMA GENERAL</b> ¿De qué manera la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral permite evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017?</p> <p><b>PROBLEMA ESPECÍFICOS</b> ¿En qué medida los procedimientos para establecer la implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral permite evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017?</p> <p>¿De qué forma se determinan las características de los sensores de un sistema de monitoreo geotécnico integral que permita evaluar el comportamiento de la estabilidad de taludes en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco en el año 2017?</p> <p>¿De qué manera se generan los mapas de riesgos con un sistema de monitoreo geotécnico integral que permita evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017?</p>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b> Implementar un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de los taludes, en el del tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.</p> <p><b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> Establecer los procedimientos de implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.</p> <p>Determinar las características de los sensores de un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de la estabilidad de taludes en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco en el año 2017.</p> <p>Generar mapas de riesgos con un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.</p>	<p><b>HIPÓTESIS GENERAL</b> La implementación de un sistema de monitoreo geotécnico integral para evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.</p> <p><b>HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b> Los procedimientos implementados para un sistema de monitoreo geotécnico integral permiten evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco, en el año 2017.</p> <p>Las características determinadas de los sensores de un sistema de monitoreo geotécnico integral permiten evaluar el comportamiento de la estabilidad de taludes en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco en el año 2017.</p> <p>Los mapas de riesgos generados con un sistema de monitoreo geotécnico integral permiten evaluar el comportamiento de los taludes, en el tajo abierto de la mina Antapaccay, región Cusco en el año 2017.</p>	<p>Un sistema de monitoreo integral, es un grupo de módulos que se vinculan para permitir la centralización e integración de los instrumentos de monitoreo, proporcionando mediciones sistemáticas repetitivas de una posición o sector; considerándose un monitoreo casi en tiempo real, si las medidas son más continuas, permitiendo la generación de alertas tempranas para minimizar los riesgos y deslizamientos potenciales que originan pérdidas materiales y humanas (SafeLand, 2012).</p>	<p>Estrategia de monitoreo</p> <p>Sistemas de comunicación</p> <p>Criterios de ubicación de los instrumentos y parámetros de medición.</p> <p>Técnicas de monitoreo.</p> <p>Características de sensores</p> <p>Tipos de sensores</p> <p>Módulos del sistema</p> <p>Umbral de alertas.</p> <p>Mapas de riesgos, alertas y reportes.</p>	<p>Ficha de registro de datos de las estrategias de monitoreo.</p> <p>Ficha de registro de datos de los sistemas de comunicación.</p> <p>Ficha de registro de los criterios de ubicación de instrumentos.</p> <p>Ficha de registro de datos de las técnicas de monitoreo.</p> <p>Ficha de registro de las características de los sensores.</p> <p>Ficha de registro de los tipos de sensores.</p> <p>Ficha de registro de los módulos del sistema.</p> <p>Ficha de registro de los umbrales</p> <p>Ficha de registro de los mapas de riesgos.</p>	<p><b>VARIABLE 2: COMPORTAMIENTO DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES.</b></p> <p>El comportamiento de taludes en macizos rocosos, son actividades complicadas que suceden en el talud en base a los factores que gobiernan su estabilidad (González de Vallejo et al., 2002).</p> <p>Desplazamientos</p> <p>Velocidades</p> <p>Aceleraciones</p> <p>Nivel freático</p> <p>Presión de poros</p> <p>Direcciones de flujo</p> <p>Temperatura</p> <p>Precipitaciones.</p> <p>Humedad relativa del aire</p>	<p>Ficha de registro de datos de las estrategias de monitoreo.</p> <p>Ficha de registro de datos de los sistemas de comunicación.</p> <p>Ficha de registro de los criterios de ubicación de instrumentos.</p> <p>Ficha de registro de datos de las técnicas de monitoreo.</p> <p>Ficha de registro de las características de los sensores.</p> <p>Ficha de registro de los tipos de sensores.</p> <p>Ficha de registro de los módulos del sistema.</p> <p>Ficha de registro de los umbrales</p> <p>Ficha de registro de los mapas de riesgos.</p> <p>Ficha de registro de datos para la medición con los sensores superficiales: Radares, Estaciones Totales, Extensómetros.</p> <p>Ficha de registro de datos para el cálculo de desplazamientos, velocidades y aceleraciones.</p> <p>Ficha de registro de datos para la medición con los sensores hidrogeológicos: Piezómetros</p> <p>Ficha de registro de datos para la medición con los sensores climatológicos: Estaciones meteorológicas</p>	<p>Método de investigación: En enfoques cuantitativos, se aplica la lógica deductiva, de lo general a lo particular (Hernández, Fernández y Baptista, 2014, p.11). Bajo esta consideración el método a aplicar es deductivo.</p> <p>Tipo: Las investigaciones que se caracterizan por el interés en la aplicación de los conocimientos teóricos a determinada situación concreta y las consecuencias prácticas que de ella se deriven, por esta razón interesa conocer para aplicar (Sánchez y Reyes, 2006, p.37). Según esta definición el tipo de investigación por su naturaleza es aplicada.</p> <p>Nivel: El interés de la investigación se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué se relaciona entre dos o más variables. Buscan las causas que originan ciertos fenómenos físicos o sociales (Borja, 2012, p14). Conforme a este concepto la investigación es del nivel explicativo.</p> <p>Diseño de la investigación Un diseño cuasi experimental de series cronológicas de un solo grupo, es aquel que no requiere grupo de control y consiste en una serie de mediciones periódicas que se realizan en el fenómeno en estudio, antes y después que se ha introducido la variable experimental (Centro de Investigación UCV, 2013, p.60). Bajo esta consideración la investigación tiene un diseño cuasi experimental de series del tiempo o series cronológicas de un solo grupo y su nomenclatura es:</p> <p>G 01 02 03 X 04 05 06 Población: Es un conjunto finito o infinito</p>

						<p>de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación (Arias, 2012, p.81). Bajo esta consideración la población está definida por los taludes desarrollados hasta este momento en el tajo abierto de la mina Antapaccay que alcanzan a 15 unidades o bancos.</p> <p>Muestra: La muestra es un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible. En caso la población, por el número de unidades que la integran, resulta accesible en su totalidad, no será necesario extraer una muestra, en consecuencia, se podrá investigar u obtener datos de toda la población objetivo (Arias, 2012, p.83). Por tratarse de una población menor el tamaño de la muestra será igual al de la población.</p> <p>Muestreo: Es la técnica o procedimiento que se emplea para seleccionar la muestra. En el caso de los muestreos no probabilístico existe el tipo intencional u opinático, por el cual los elementos son escogidos con base en criterios o juicios preestablecidos por el investigador (Arias, 2012, p.85). En la investigación se empleó el muestreo no probabilístico del tipo intencional.</p> <p>Técnica: La observación es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos (Arias, 2012, p.69). En esta investigación la técnica empleada es la observación directa de los hechos.</p> <p>Instrumento: Es cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información (Arias, 2012, p. 70). En esta investigación el instrumento es la Ficha de Recolección de Datos.</p>
--	--	--	--	--	--	--

Nota: Las hipótesis presentadas son pseudo-hipótesis, porque no serán contrastadas según el tipo de investigación.

## Anexo D. Plano de instrumentación y registro fotográfico



Fuente: GeoAnalizador

**Figura 8.1:** Plano de instrumentación.

## Registro fotográfico



Figura 8.2: Registro de equipos de monitoreo en mina.

## Anexo E. Arquitectura del sistema implementado



Figura 8.3: Arquitectura del sistema de monitoreo geotécnico integral.